

Evaluación de las combinaciones de agregados para mezclas asfálticas, con indicadores de trabazón y acomodo.

Evaluation of combinations of aggregates for asphalt mixtures, with interlocking and accommodation indicators.

Araujo, Nómar^{1*}; Castellanos, Jimmy²

¹Grupo de Investigación en Ciencia, Tecnología e Ingeniería (GICTI), Departamento de Ingeniería, NURR-ULA, Universidad de Los Andes, Trujillo, Venezuela.

²Gerencia de Proyectos PDVSA-Occidente, Venezuela.

*nomaraaraujo14@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.53766/CEI/2022.43.03.04>

Resumen

La selección de la estructura granular por efecto de la combinación de agregados, es un procedimiento fundamental para el diseño de mezclas asfálticas, ya que gran parte de la resistencia a la deformación permanente que exhibe al formar parte de un pavimento carretero, está directamente relacionada con la calidad propia de los agregados y con su arreglo o composición granulométrica, por ello, una buena selección de agregados proporcionará una mezcla asfáltica con buenas prestaciones ante estas degradaciones. En este trabajo, se realizó una evaluación por medio de índices de empaquetamiento y trabazón definidos en el Método Bailey a las estructuras granulométricas resultantes de las diferentes combinaciones que se obtienen con la aplicación del combinador de agregados de RAM-CODES Software, con el objetivo de determinar las posibles mezclas que más allá de cumplir con una especificación, tengan una distribución equilibrada en cuanto al tamaño de sus partículas, ajuste de vacíos y propiedades volumétricas. Para ello, se dispuso de un diseño de mezcla asfáltica originalmente planteado en el laboratorio de una planta procesadora y se evaluaron las posibles mezclas de agregados que cumplen con la especificación de referencia empleada, calculando en cada alternativa los indicadores con enfoque al empaquetamiento y trabazón de sus partículas en la composición granular, obteniéndose un conjunto exclusivo de granulometrías que de acuerdo a la metodología empleada, constituyen mezclas equilibradas con propiedades volumétricas controladas y resistentes a las deformaciones plásticas.

Palabras clave: mezclas asfálticas, combinador de agregados, método Bailey, trabazón de agregados.

Abstract

The selection of the granular structure by effect of the aggregates combination, is a fundamental procedure to the design of asphalt mixtures, because much of the resistance to permanent deformation that it exhibits when forming part of a road pavement, is directly related to the quality of the aggregates and with their arrangement or granulometric composition, therefore, a good aggregates selection of will provide an asphalt mix with good performance against these degradations. In this evaluation, an analysis was made through packing and interlocking indexes defined in the Bailey Method to the granulometric structures that resulted from the different combinations obtained with the application of the combiner of aggregates RAMCODES, with the purpose of determine the asphalt mixtures possible that beside of meeting a specification, have a balanced distribution in terms of particle size, voids adjustment and volumetric properties. In order to achieve this purpose, an asphalt mixture design was used which was originally proposed in the laboratory of a processing plant and the possible mixtures of aggregates that meet the reference specification used were evaluated, calculating in each alternative the indicators focusing on the packing and interlocking in the granular composition of its particles. As a result of this evaluation, an exclusive set of granulometries was obtained which, according to the methodology used, constitute balanced mixtures with controlled volumetric properties and resistant to plastic deformations.

Keywords: asphalt mixtures, combiner of aggregates, Bailey method, interlock of the aggregates.

1 Introducción

El diseño de mezclas asfálticas fundamentalmente consiste en determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico que mezclado con una buena combinación de agregados pétreos y después de un proceso de compactación conformar una matriz de agregados, asfalto y vacíos, con propiedades mecánicas para exhibir un buen desempeño ante las cargas impuestas por el tráfico, bajo condiciones ambientales particulares y para un periodo prestablecido.

Las metodologías de diseño proponen una serie de evaluaciones específicas de calidad para los materiales, estos son valorados tanto de manera individual como en la mezcla compacta, para que puedan desarrollar características de estabilidad, resistencia, durabilidad, impermeabilidad, trabajabilidad entre otras, con el objetivo de soportar los mecanismos de deterioro a lo largo del tiempo de diseño.

Diversas funciones deben cumplir estos materiales, por tanto, su selección y validación de sus propiedades es imprescindible, particularmente el material pétreo proporciona la capacidad estructural de la mezcla. Un agregado de buena calidad y con una estructura granular bien seleccionada dará como resultado una mezcla asfáltica con buenas prestaciones ante degradaciones como las deformaciones permanentes (ahuellamiento).

La combinación de los distintos minerales pétreos que se dispongan en una planta, generará mezclas de agregados que deberán estar dentro de las bandas o especificaciones granulométricas de referencia. Comúnmente, la selección de la estructura del agregado es el resultado de la experiencia y experticia del diseñador, pero también se aplican criterios como la curva de máxima densidad o simplemente las franjas granulométricas de las normativas de construcción. Otra alternativa para determinar las proporciones de participación de cada uno de los agregados individuales disponibles es conocida como el "Método Bailey". Este procedimiento basado en conceptos de trabazón y empaquetamiento establece una relación entre la granulometría y los parámetros volumétricos, además, permite evaluar la calidad de la estructura granular en función de los vacíos y acomodo de las partículas (Vavrik y col., 2002).

Las especificaciones granulométricas pueden generar una variedad de posibles porcentajes de participación individual de los minerales pétreos, con aplicaciones como el "Combinador de Agregados" y la "Carta de Gradación" de la metodología RAMCODES, se pueden obtener diferentes aproximaciones y combinaciones de los agregados que cumplan con los límites granulométricos normativos.

En este trabajo se propone una evaluación de las diferentes combinaciones matemáticamente posibles que se obtiene de manera automatizada con la aplicación del RAMCODES Software. Cada mezcla alternativa de agregados propuesta, es examinada con indicadores o parámetros de análisis formulados en el método Bailey, para evaluar las estructuras granulométricas resultantes en función del acomodo y trabazón del agregado, destacando así, las

combinaciones que cumplan con los criterios asociados a este método y que según sus principios, permite obtener estructuras de agregados minerales con eficaz relación entre su composición granular y parámetros volumétricos, para el diseño de mezclas asfálticas con buena resistencia mecánica a la deformación permanente.

2 Marco Teórico

2.1 Carta de Gradación

Una carta de gradación para mezclas asfálticas es un ambiente gráfico en el cual se puede representar granulometrías, husos granulométricos (especificaciones), respuestas mecánicas e hidráulicas y costos de la mezcla asfáltica. Esta técnica fue desarrollada por la metodología RAMCODES.

Para elaborar una carta de gradación se emplea el ajuste Fuller de los puntos granulométricos por medio de un modelo muy sencillo de solo dos parámetros, como: el factor de forma (n) y el diámetro máximo (D_{max}).

Para la aplicación correcta de este ajuste hay que velar que el $R^2 \geq 0.97$, si R^2 está entre $[0.97-0.95]$ hay que ser cuidadosos con la aplicación y si $R^2 < 0.95$ el ajuste no funciona (Sánchez 2007). Esta técnica además es solo aplicable a granulometrías continuas como COVENIN, INVEAS, Superpave, Protocolo Mexicano y SCT.

En la carta de gradación, una curva se representa como un punto y un huso o una especificación granulométrica es un ámbito que establece un recuadro o espacio donde todas las granulometrías que estén dentro de los parámetros o especificaciones (máximo y mínimo) se ubican dentro de ese recuadro llamado ámbito. En la figura 1, se representan los ámbitos para gradaciones COVENIN 2000-80 densas y abiertas, los ámbitos de la especificación se muestran como rectángulos etiquetados según el tipo de mezcla.

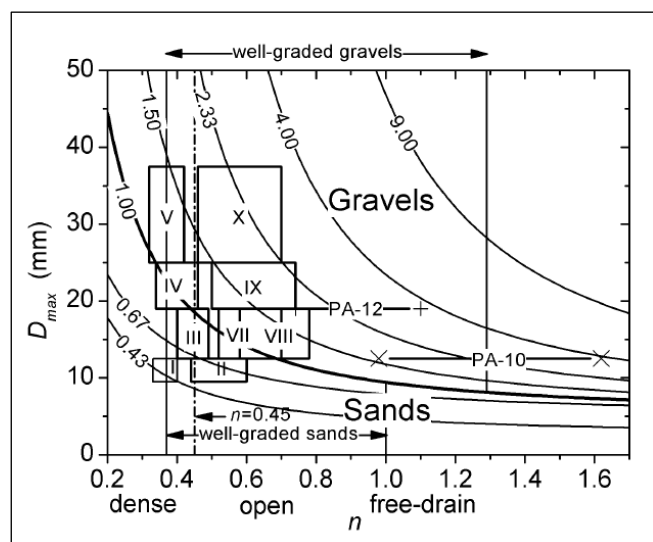


Fig. 1. Carta de gradación para especificaciones tradicionales COVENIN 2000-80. Fuente: (Manual RAMCODES 2009).

2.2 Combinador de Agregados

Es una aplicación de RAMCODES software que permite hacer combinaciones de los agregados por medio de un proceso de iteración abierta de manera automatizada, con enfoque en el modelo de Fuller y el concepto de la carta de gradación. En esta herramienta se obtienen aproximaciones de los porcentajes de participación de los agregados disponibles en planta o laboratorio, es considerada como una gran ayuda para el diseñador y el laboratorista en el proceso de combinación de los materiales más no como una solución definitiva, pero que genera diferentes alternativas de mezclas de agregados que están dentro de los límites granulométricos de la especificación de referencia.

En la figura 2, se muestra la ventana principal de trabajo de la aplicación del combinador de agregados, en esta hoja de trabajo se puede observar las granulometrías de cada uno de los materiales disponibles, así como las especificaciones que establecerán los límites granulométricos de las diferentes mezclas que se desean obtener.

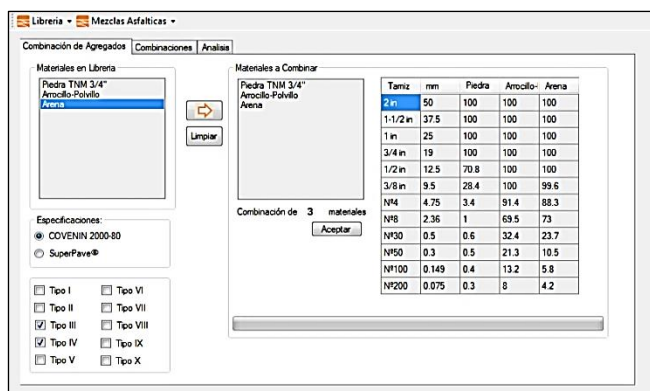


Fig. 2. Hoja de trabajo de la aplicación combinador de agregados del RAMCODES Software.

Los resultados de las combinaciones que se calculan según los diferentes porcentajes de participación de cada agregado involucrado, se presentan asociados con parámetros como el factor de forma (n) y el diámetro máximo ($D_{m\acute{a}x}$) del ajuste Fuller definidos en la carta de gradación, además, se plotean todas las combinaciones obtenidas en el ámbito de las especificaciones de referencia.

Es importante señalar que el combinador de agregados muestra los resultados de las proporciones cuyas granulometrías tienen un ajuste con un $R^2 \geq 0.97$, esta limitante descarta las combinaciones que no cumplan con este criterio, sin embargo, el número de alternativas que se obtienen de este proceso automatizado es suficiente para la selección tentativa de granulometrías de prueba para los análisis subsiguientes en los procesos de diseño.

2.3 Método Bailey

El Método Bailey es un enfoque sistemático para mezclar agregados que proporciona una trabazón entre partículas

como la columna vertebral de la estructura y una gradación continua equilibrada de la mezcla. El método proporciona un conjunto de herramientas que permite la evaluación de mezclas de agregados, aporta criterios para una mejor comprensión de la relación entre la gradación y los vacíos de la mezcla. Con la aplicación de este método es posible desarrollar y ajustar mezclas de agregados, con una trabazón y un buen empaque de las partículas, dando como resultado mezclas con resistencia a la deformación permanente y mantenimiento en el tiempo de las propiedades volumétricas que brindan resistencia al efecto ambiental.

El Método Bailey fue desarrollado originalmente por el Sr. Robert Bailey del Departamento de Transporte de Illinois, como un medio para combatir la formación de roderas en las mezclas asfálticas, mientras mantiene las características de durabilidad adecuadas. Los procedimientos propuestos originalmente por Bailey fueron refinados por el Dr. Bill Vavrik, de la División de Consultoría ERES de Applied Research Associates, Inc., y el Sr. Bill Pine de Heritage Research, para presentar un enfoque sistemático de la mezcla de agregados y que es aplicable a todas las mezclas asfálticas densas, independientemente del tamaño máximo del agregado.

El principio del método es el empaquetamiento de los agregados, el cual no es total por efecto de la compactación, siempre existen vacíos entre las partículas. El empaquetamiento depende de diversas variables como el tipo y energía de compactación, la forma y textura de las partículas, la resistencia a la abrasión y principalmente por el tamaño y la granulometría (Vavrik y col., 2002).

Para la selección de la combinación de agregados por volumen, se debe determinar la cantidad y el tamaño de los vacíos creados por los agregados gruesos y llenar esos vacíos con la cantidad apropiada de agregado fino. Para cada una de las pilas de agregado grueso, se deben determinar los pesos unitarios sueltos (Loose Unit Weight, LUW) y con varilla (Rodded Unit Weight, RUW), el peso unitario RUW, representa el volumen de vacíos presentes cuando las partículas están en un contacto mayor gracias el esfuerzo de compactación aplicado por una varilla. Para cada pila de agregado fino, se debe determinar el peso unitario con varilla. Estas medidas proporcionan los datos volumétricos en la estructura de vacío específica requerida para evaluar las propiedades de trabazón.

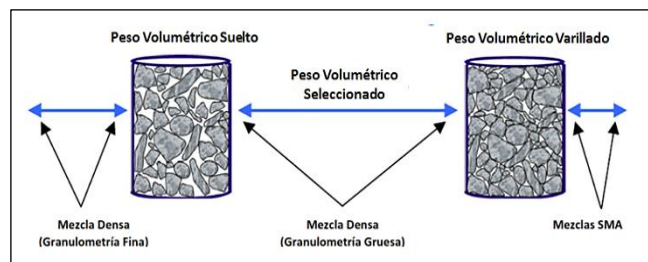


Fig. 3. Selección del peso unitario elegido de agregados gruesos. Fuente: (Circular E-C044, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, Transportation Research Board, October 2002)

Para seleccionar un *peso unitario elegido*, se debe

decidir si la mezcla se clasificará de forma gruesa o fina. Las consideraciones para seleccionar un peso unitario elegido se muestran en la figura 3.

De acuerdo a este método, después de obtener la combinación de los agregados por peso y definir una estructura granular de la mezcla, se deben analizar las propiedades de empaquetamiento. La mezcla combinada se divide en tres porciones distintas y cada porción se evalúa individualmente. La porción gruesa de la mezcla combinada es desde la partícula más grande hasta el tamiz de control primario (PCS), estas partículas se consideran como los agregados gruesos de la mezcla, el agregado fino se descompone y se evalúa en dos porciones. En la figura 4, se muestra la división por tamaños que aplica el método.

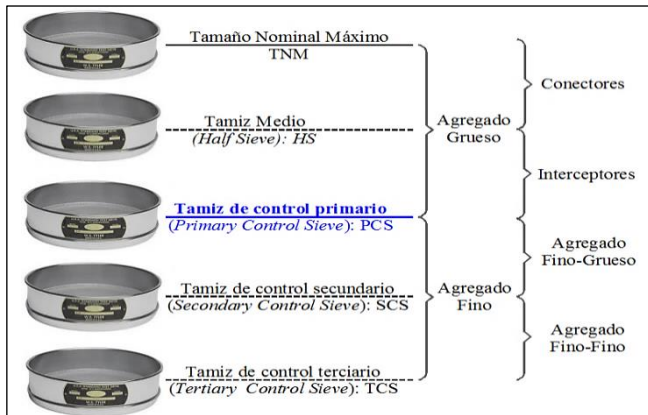


Fig. 4. División por tamaños según el Método Bailey.

Para analizar una mezcla o combinación de agregados se debe tener presente la división novedosa que realiza el método, donde los agregados gruesos (Coarse Aggregate, CA) tienen una parte gruesa y una fina, los finos (Fine Aggregate, FA) tienen también una parte gruesa y otra fina.

El principio consiste en que los gruesos generan espacios vacíos entre partículas, los cuales deben ser ocupados por los finos, para definir la frontera entre finos y gruesos, se establecen los tamices de control.

Primero se debe determinar el tamaño nominal máximo (TNM), según definición de Superpave se ubica la primera malla que retiene más del 10%, una vez identificada se determina el tamaño nominal máximo como la malla superior. En el contexto de la metodología Bailey, el TNM se redefinió como la malla superior a la primera que retenga más del 15% del material. Esta nueva definición ayudó a solucionar algunos problemas relacionados principalmente con las mezclas de granulometría fina (Pine 2009).

El tamiz medio HS (Half Sieve) establece la frontera entre gruesos-gruesos (Conectores) y gruesos-finos (Interceptores), se dispone en la mitad del TNM y se calcula según la ecuación 1.

$$HS = TNM/2 \quad (1)$$

El tamiz de control primario PCS (Primary control

sieve), define la frontera entre la parte gruesa y la fina de la gradación. Aunque en la práctica común es el tamiz # 4 (4.75 mm) aquel que separa dichas fracciones, en el método Bailey el PCS es función del TNM. La ecuación 2, se emplea para determinar la malla de control primario.

$$PCS = 0.22 * TNM \quad (2)$$

El valor de 0.22 utilizado en la ecuación del tamiz de control se determinó a partir de un análisis bidimensional (2-D) y tridimensional (3-D) del empaque de partículas de diferentes formas. El factor 0.22, es la condición promedio de muchas configuraciones de empaque diferentes, el análisis de gradación no se ve afectado si el valor varía de 0.18 a 0.28.

El tamiz de control secundario SCS (Secondary control sieve), separa los finos-gruesos de los finos-finos. Este se calcula según la ecuación 3.

$$SCS = 0.22 * PCS \quad (3)$$

El tamiz de control terciario TCS (Tertiary control sieve), representa la frontera entre las dos porciones de los finos-finos. Este se determina según la ecuación 4.

$$TCS = 0.22 * SCS \quad (4)$$

En la tabla 1, se presenta el tamaño (mm) de las mallas calculado por las ecuaciones 1 a la 4, ordenados en función del tamaño nominal máximo del agregado (TNM). Los tamices medio (HS), de control primario (PCS), secundario (SCS) y terciario (TCS), son seleccionados de acuerdo con los criterios propuestos.

Tabla 1. Lista de tamices de control para varios tamaños nominales de mezcla asfáltica densa. Fuente: (Circular E-C044, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, Transportation Research Board, October 2002)

Tamiz	Tamaño Nominal Máximo (TNM), mm					
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75
HS	19.0	12.5	9.5	6.25	4.75	2.36
PCS	9.5	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
SCS	2.36	1.18	1.18	0.60	0.60	0.30
TCS	0.60	0.30	0.30	0.15	0.15	0.075

Para evaluar el empaquetamiento de la porción gruesa de la gradación y para analizar la estructura de vacíos resultante se utiliza la relación CA (Coarse Aggregate). Las partículas más pequeñas que el tamiz medio (HS) denominados "interceptores", son demasiado grandes para caber en los vacíos creados por las partículas de agregado grueso más grandes y, por lo tanto, los separan. El equilibrio de estas partículas se puede utilizar para ajustar las propiedades volumétricas de la mezcla. Al cambiar la cantidad de interceptores, es posible cambiar los vacíos del agregado mineral (VAM) en la mezcla para producir una estructura de agregado grueso equilibrada. Con una estructura de agregado grueso equilibrada, la

mezcla debe ser fácil de compactar en el campo y debe funcionar adecuadamente bajo carga.

La ecuación 5, se aplica para el cálculo de la relación de agregado grueso (CA).

$$CA = \frac{\%P_{HS} - \%P_{PCS}}{100 - \%P_{HS}} \quad (5)$$

Dónde:

$\%P_{HS}$ = porcentaje que pasa el tamiz medio.

$\%P_{PCS}$ = porcentaje que pasa el tamiz de control.

El empaquetamiento de la fracción de agregado grueso, observado a través de la relación CA, es un factor principal en la capacidad de construcción de la mezcla. A medida que disminuye la relación CA (por debajo de 1), la compactación de la fracción de agregado fino aumenta porque hay menos interceptores para limitar la compactación de las partículas de agregado grueso más grandes. Por lo tanto, una mezcla con una proporción de CA baja generalmente requiere una estructura de agregado fino más fuerte para cumplir con las propiedades volumétricas requeridas.

A medida que la proporción de CA aumenta hacia 1, aumentará VAM. Sin embargo, a medida que este valor se acerca a 1, la fracción de agregado grueso se desequilibra porque los agregados del tamaño del interceptor están intentando controlar el esqueleto de agregado grueso. A medida que la relación CA excede un valor de 1, las partículas del tamaño de un interceptor comienzan a dominar la formación del esqueleto de agregado grueso. La porción gruesa del agregado grueso se considera entonces "tapones", ya que estas no controlan el esqueleto del agregado, sino que flotan en una matriz de partículas de agregado grueso más finas. Una relación CA por debajo del rango correspondiente sugerido en la tabla 2, podría indicar una mezcla que puede ser propensa a la segregación.

Tabla 2. Rangos recomendados para los parámetros propuestos en el método Bailey según el tamaño nominal máximo. Fuente: (Circular E-C044, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, Transportation Research Board, October 2002)

Tamiz	Tamaño Nominal Máximo (TNM), mm					
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75
CA	0.80-0.95	0.70-0.85	0.60-0.75	0.50-0.65	0.40-0.55	0.30-0.45
FAC	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50
FAf	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50	0.35-0.50

Todo el agregado fino (es decir, por debajo del PCS) puede verse como una mezcla por sí misma que contiene una porción gruesa y una fina y puede evaluarse de una manera similar a la mezcla general. La porción gruesa del agregado fino crea huecos que se llenarán con la porción fina del agregado fino. Al igual que con el agregado grueso, se desea llenar estos vacíos con el volumen apropiado de la porción fina del agregado fino. La ecuación 6, describe la relación gruesa del agregado fino (FAC).

$$FAC = \frac{\%P_{SCS}}{\%P_{PCS}} \quad (6)$$

Dónde:

$\%P_{SCS}$ = porcentaje que pasa el tamiz de control secundario.

$\%P_{PCS}$ = porcentaje que pasa el tamiz de control.

Generalmente es deseable que la relación FAC sea menor de 0.50, ya que los valores más altos indican que se incluye en la mezcla una cantidad excesiva de la porción fina del agregado fino. Debe evitarse una relación FAC superior a 0.50, que se crea por una cantidad excesiva de arena natural o una arena natural excesivamente fina.

Si la relación FAC es menor a 0.35, la gradación no es uniforme lo que puede indicar inestabilidad y provocar problemas de compactación. Esta relación tiene un impacto considerable en el VAM, debido a la mezcla de arenas y la creación de vacíos en el agregado fino. El VAM en la mezcla aumentará con una disminución en esta proporción.

La porción fina del agregado fino (FA_f), llena los vacíos creados por la porción gruesa del agregado fino. Esta relación muestra cómo se empaqueta la porción fina del agregado fino. La relación FA_f se utiliza para evaluar las características de empaque de la porción más pequeña de la mezcla de agregados. De manera similar a la relación FAC, el valor de la relación FA_f debe ser inferior a 0.50 para mezclas densas graduadas típicas. El VAM en la mezcla también aumentará con una disminución en esta proporción. El índice de FA_f , se calcula por medio de la ecuación 7.

$$FA_f = \frac{\%P_{TCS}}{\%P_{SCS}} \quad (7)$$

Dónde:

$\%P_{TCS}$ = porcentaje que pasa el tamiz de control terciario.

$\%P_{SCS}$ = porcentaje que pasa el tamiz de control secundario.

En una mezcla asfáltica de granulometría gruesa, la trabazón del agregado grueso juega un papel importante en la resistencia a la deformación permanente. Sin embargo, en mezclas de grano fino, el agregado fino es predominante para desempeñar esta resistencia. Las mezclas finas generalmente se definen como mezclas de agregados combinados cuya curva granulométrica está por encima de la línea de máxima densidad en una curva de gradación representada en la gráfica de Fuller (Potencia de 0,45). Desde la perspectiva del Método Bailey, las mezclas finas contienen un volumen de agregado fino que excede el volumen de huecos en la condición de peso unitario suelto de agregado grueso.

En este proceso, luego de la selección de las proporciones, se evalúa la gradación de la mezcla combinada por debajo del PCS original como una mezcla completa por sí misma, se determinan nuevos tamices de control NewPCS y posteriormente los sucesivos tamices de control secundario NewHS, NewSCS y NewTCS. La tabla 3, muestra los nuevos tamices de control correspondientes para una mezcla fina en

función del TNM.

Tabla 3. Lista de los nuevos tamices de control para el análisis de mezclas finas. Fuente: (Circular E-C044, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, Transportation Research Board, October 2002)

Tamiz	Tamaño Nominal Máximo (TNM), mm					
	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75
PCS _{original}	9.5	4.75	4.75	2.36	2.36	1.18
NewHS	4.75	2.36	2.36	1.18	1.18	0.60
NewPCS	2.36	1.18	1.18	0.60	0.60	0.30
NewSCS	0.60	0.30	0.30	0.15	0.15	0.075
NewTCS	0.15	0.075	0.075	**	**	**

**Para estas mezclas, solo se pueden determinar las relaciones NewCA y NewFA_c.

Para determinar los nuevos parámetros de análisis (NewCA, NewFA_c y NewFA_f) en combinaciones de mezclas de grano fino, se aplican las ecuaciones 5, 6 y 7 pero empleado los nuevos tamices de referencia indicados en la tabla 3. En mezclas finas, la relación NewCA tiende a ser más variable que en mezclas de grado grueso; por lo tanto, el rango recomendado es más amplio y debe estar entre 0.60 a 1. Para la relación NewFA_c se tiene en cuenta que a medida que disminuya la proporción de NewFA_c, aumentará el VMA, por tanto el rango recomendado está entre 0.35 a 0.50. De igual manera para evaluar el índice NewFA_f se tiene el mismo rango anterior [0.35 – 0.50].

3 Procedimiento Metodológico

La temática del presente trabajo consistió en evaluar la estructura granulométrica resultante de las diferentes combinaciones que se obtienen con la aplicación del combinador de agregados (RAMCODES Software), por medio de índices de empaquetamiento y trabazón definidos en el método Bailey, con el objetivo de determinar las posibles mezclas que más allá de cumplir con una especificación granulométrica, tengan una distribución equilibrada en cuanto al tamaño de sus partículas, estructura de vacíos y propiedades volumétricas.

3.1 Fase 1: Granulometría de los materiales y especificaciones de referencia.

Para el análisis se requiere determinar las combinaciones de agregados con una estructura granular adecuada para producir mezclas asfálticas densas de tipo III o IV, según las especificaciones de referencia COVENIN 2000-80, este tipo de mezclas son tradicionalmente diseñadas en Venezuela para rodamientos, para capas intermedias y bases. Para ello, se dispone de un diseño de mezcla asfáltica originalmente planteado en el laboratorio de una planta procesadora y donde se tienen tres tipos diferentes de agregados, como piedra picada (TNM 3/4”), arrocillo-polvillo y arena. La distribución porcentual por tamaño de cada material se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Granulometría de los agregados procesados en planta.

Tamiz (mm)	%Pasante		
	Piedra Picada. TNM 3/4” (19mm)	Arrocillo-Polvillo	Arena
19.0	100	100	100
12.5	70.8	100	100
9.5	28.4	100	99.6
4.75	3.4	91.4	88.3
2.36	1.0	69.5	73.0
0.60	0.6	32.4	23.7
0.30	0.5	21.3	10.5
0.15	0.4	13.2	5.8
0.075	0.3	8.0	4.2

El diseño inicial de mezcla asfáltica elaborado por el laboratorio de la planta, propuso la dosificación siguiente: 30% de piedra picada (TNM 3/4”), 35% de arrocillo-polvillo y 35% del material de arena. Esta proporción establece una mezcla de agregados que está dentro de la especificación para mezclas COVENIN tipo III.

En la tabla 5, se muestran los límites granulométricos de la norma venezolana COVENIN 2000-80, para mezclas de agregado tipo III y IV. En las filas inferiores se presentan las coordenadas punto-ámbito del ajuste de cada grupo de puntos de control por medio del modelo Fuller establecido en la metodología RAMCODES.

Tabla 5. Límites granulométricos para mezclas COVENIN 2000-80 y coordenadas punto-ámbito. Fuente: (Manual RAMCODES 2009)

Tamiz Pulg (mm)	%Pasante	
	Tipo III (Rodamiento)	Tipo IV (Rod. o Intermedia)
1”(25.0)		100
3/4”(19.0)	100	80 – 100
1/2”(12.5)	80 – 100	
3/8”(9.5)	70 – 90	60 – 80
No.4(4.75)	50 – 70	48 – 65
No.8(2.36)	35 – 50	35 – 50
No.30(0.60)	18 – 29	19 – 30
No.50(0.30)	13 – 23	13 – 23
No.100(0.15)	8 – 16	7 – 15
No.200(0.075)	4 – 10	2 – 8
Superior (n/D _{max})	0.40/12.5	0.34/19.0
R ²	0.998	0.991
Inferior (n/D _{max})	0.49/19.5	0.46/25.0
R ²	0.9989	0.990

Tabla 6. Calidad de los materiales.

Propiedad	Valores obtenidos	Especificación
Partículas alargadas y planas	4	≤ 10
Desgaste de Los Angeles	27	≤ 40
Desg. en sulfato de magnesio	9	≤ 15
% de caras prod. por fractura	92	≥ 80
Equivalente de arena	68	≥ 45

En la tabla 6, se muestran los resultados de las propiedades de calidad de los agregados, estos se evaluaron de

acuerdo a la normativa y los procedimientos de laboratorio, cumpliendo en cada uno con las especificaciones para el nivel de tránsito requerido.

En la tabla 7, se presentan los resultados de las propiedades evaluadas en la mezcla asfáltica definida en el diseño original.

Tabla 7. Propiedades de la mezcla asfáltica previamente diseñada.

Característica	Valores obtenidos	Especificación
Estabilidad Marshall (lbs)	1950	> 1200
Flujo (1/100 mm)	11.40	8 - 16
Vacios llenados con asfalto	75	75 - 85
Vacios totales de la mezcla	4.0	3 - 5
Vacios de agregado mineral VAM	16.80	> 13
Óptimo de asfalto	5.5	

3.2 Fase 2: Aplicación del combinador de agregados para determinar los porcentajes de la mezcla de agregados.

En esta fase se procesaron los datos de las granulometrías de los materiales disponibles con la aplicación del combinador de agregados del RAMCODES software. En la figura 2, se presenta la hoja de trabajo de dicha aplicación, aquí se introducen los datos de los porcentajes pasantes de cada granulometría, se selecciona la especificación de referencia del tipo de mezcla que se desea analizar y se inicia el proceso automatizado de combinación.

Posteriormente, se obtienen los porcentajes resultantes del procesamiento asociados a valores de factor de forma (n) y diámetro máximo ($D_{m\acute{a}x}$). Para los agregados estudiados, el software determino 37 combinaciones matemáticamente posibles para el ámbito granulométrico de las mezclas tipo III y para las mezclas tipo IV no se obtuvieron combinaciones. Los valores de los porcentajes resultantes de estas combinaciones se muestran en la tabla 8, así como las coordenadas de la carta de gradación (n y $D_{m\acute{a}x}$).

Como se puede observar en la tabla 8, la dosificación propuesta en planta para la mezcla de agregados corresponde a la combinación identificada con el número 6 calculada por RAMCODES software, lo que ratifica que la dosificación preseleccionada está dentro de las especificaciones para mezclas tipo III.

En la figura 5, se muestra la carta de gradación con las 37 combinaciones calculadas, también se traza el espacio correspondiente de los límites granulométricos para las mezclas COVENIN tipo III y IV indicados en la tabla 5. Como se puede observar en la figura 5, todas las combinaciones posibles ploteadas en la carta de gradación (n vs $D_{m\acute{a}x}$) están en el ámbito de las mezclas densas tipo III, es decir, todas cumplen con los límites granulométricos exigidos por la norma.

Tabla 8. Resultados de 37 combinaciones obtenidas para mezclas tipo III.

Nro	Coordenadas		Combinación		
	n	Dmax	Piedra picada TNM 3/4"	Arrocillo-Polvillo	Arena
1	0.403	16.164	0.25	0.50	0.25
2	0.442	16.650	0.30	0.15	0.55
3	0.439	16.675	0.30	0.20	0.50
4	0.437	16.708	0.30	0.25	0.45
5	0.426	16.689	0.30	0.30	0.40
6	0.425	16.730	0.30	0.35	0.35
7	0.425	16.790	0.30	0.40	0.30
8	0.415	16.760	0.30	0.45	0.25
9	0.415	16.818	0.30	0.50	0.20
10	0.416	16.887	0.30	0.55	0.15
11	0.408	16.875	0.30	0.60	0.10
12	0.409	16.942	0.30	0.65	0.05
13	0.401	16.950	0.30	0.70	0.00
14	0.474	17.149	0.35	0.00	0.65
15	0.468	17.166	0.35	0.05	0.60
16	0.462	17.171	0.35	0.10	0.55
17	0.458	17.202	0.35	0.15	0.50
18	0.455	17.232	0.35	0.20	0.45
19	0.452	17.271	0.35	0.25	0.40
20	0.450	17.318	0.35	0.30	0.35
21	0.449	17.373	0.35	0.35	0.30
22	0.448	17.418	0.35	0.40	0.25
23	0.438	17.412	0.35	0.45	0.20
24	0.438	17.476	0.35	0.50	0.15
25	0.439	17.539	0.35	0.55	0.10
26	0.430	17.542	0.35	0.60	0.05
27	0.431	17.615	0.35	0.65	0.00
28	0.485	17.737	0.40	0.15	0.45
29	0.481	17.768	0.40	0.20	0.40
30	0.478	17.807	0.40	0.25	0.35
31	0.475	17.855	0.40	0.30	0.30
32	0.473	17.911	0.40	0.35	0.25
33	0.472	17.957	0.40	0.40	0.20
34	0.461	17.972	0.40	0.45	0.15
35	0.461	18.026	0.40	0.50	0.10
36	0.461	18.090	0.40	0.55	0.05
37	0.452	18.114	0.40	0.60	0.00

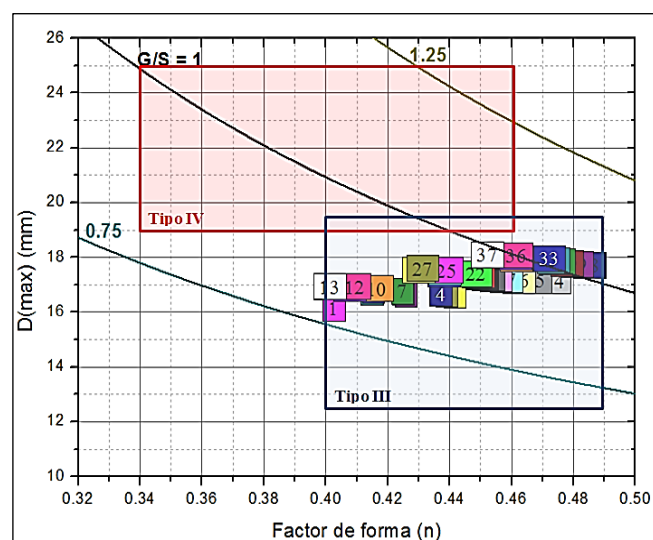


Fig. 5. Carta de gradación con las combinaciones calculadas y los ámbitos granulométricos de las mezclas tipo III y IV.

3.3 Fase 3: Evaluación de las combinaciones de agregados según los índices de trabazón y empaquetamiento del método Bailey.

En esta fase se realizó la evaluación de las combinaciones de los agregados con parámetros definidos en el método Bailey. El análisis preliminar se refiere a las gradaciones de cada mezcla combinada ploteadas en un gráfico de Fuller (Potencia de 0,45), dado que las curvas granulométricas de las 37 combinaciones están por encima de la línea de máxima densidad (LMD), se definen como estructuras de granulometrías finas.

Para mezclas finas, se evalúa la gradación de la mezcla combinada por debajo del PCS original, para ello, se determinó el TNM según el método Bailey de manera de seleccionar los nuevos tamices de control presentados en la tabla 3. Seguidamente se aplicaron las relaciones 5, 6, y 7 para calcular los índices NewCA, NewFA_c y NewFA_f para la evaluación del acomodo y empaquetamiento de cada estructura granulométrica propuesta en cada combinación de agregados.

Tabla 9. Parámetros de evaluación del método Bailey calculados por cada combinación de agregados.

Nro	Coordenadas		Índices [Rango]		
	n	Dmax	NewCA [0.60 - 1.0]	NewFA _c [0.35-0.50]	NewFA _f [0.35 - 0.50]
1	0.403	16.164	0.975	0.368	N/A
2	0.442	16.650	0.976	0.293	N/A
3	0.439	16.675	0.975	0.308	N/A
4	0.437	16.708	0.975	0.317	N/A
5	0.426	16.689	0.975	0.330	N/A
6	0.425	16.730	0.974	0.343	N/A
7	0.425	16.790	0.980	0.350	N/A
8	0.415	16.760	0.980	0.362	N/A
9	0.415	16.818	0.972	0.374	N/A
10	0.416	16.887	0.979	0.384	N/A
11	0.408	16.875	0.978	0.391	N/A
12	0.409	16.942	0.978	0.402	N/A
13	0.401	16.950	0.977	0.410	N/A
14	0.474	17.149	0.975	0.250	N/A
15	0.468	17.166	0.981	0.267	N/A
16	0.462	17.171	0.975	0.285	N/A
17	0.458	17.202	0.974	0.296	N/A
18	0.455	17.232	0.980	0.310	N/A
19	0.452	17.271	0.980	0.326	N/A
20	0.450	17.318	0.972	0.335	N/A
21	0.449	17.373	0.979	0.348	N/A
22	0.448	17.418	0.978	0.361	N/A
23	0.438	17.412	0.978	0.369	N/A
24	0.438	17.476	0.977	0.380	N/A
25	0.439	17.539	0.977	0.392	N/A
26	0.430	17.542	0.976	0.404	N/A
27	0.431	17.615	0.984	0.408	N/A
28	0.485	17.737	0.979	0.304	N/A
29	0.481	17.768	0.978	0.315	N/A
30	0.478	17.807	0.978	0.331	N/A
31	0.475	17.855	0.977	0.345	N/A
32	0.473	17.911	0.977	0.354	N/A
33	0.472	17.957	0.976	0.369	N/A
34	0.461	17.972	0.984	0.380	N/A
35	0.461	18.026	0.975	0.388	N/A
36	0.461	18.090	0.974	0.401	N/A
37	0.452	18.114	0.982	0.411	N/A

En la tabla 9, se muestran los resultados de los índices calculados, estos se presentan asociados a las coordenadas (n y D_{máx}) definidas en la carta de gradación. En este caso no fue necesario determinar el índice NewFA_f, ya que para mezclas de agregados con TNM de 12.5mm no es requerido, ya que no tienen relevancia en el análisis granulométrico de acuerdo a la perspectiva del método Bailey.

4 Discusión y Resultados

Determinados todos los parámetros establecidos por el método Bailey, para la evaluación de la estructura granulométrica de cada combinación de agregados calculada en la aplicación de RAMCODES Software, se presenta a continuación, un conjunto de gráficos con los resultados indicadores del empaquetamiento de cada estructura granulométrica estudiada.

Según los postulados del método Bailey, el índice NewCA presenta una extensa variabilidad y su rango recomendado es amplio [0.60 - 1.0], de acuerdo a esto, las 37 combinaciones estudiadas cumplen con este parámetro de evaluación, sin embargo, no es determinante para la valoración del empaquetamiento y trabazón de las estructuras de granulometría finas. Como se aprecia en la tabla 9, en las 37 combinaciones el índice NewCA está en el rango recomendado, obteniéndose valores ligeramente menores a 1.

Para un mejor análisis de los criterios de acomodo de la estructura de mezclas de clasificación fina, es determinante evaluar los resultados del índice característico de la porción gruesa del agregado fino (NewFA_c), ya que este parámetro está asociado directamente con los valores de VAM de la mezcla, además, es un criterio predominante relacionado con la resistencia a degradaciones como la deformación plástica. Según el método Bailey, a medida que disminuya la proporción de NewFA_c aumentará el VAM, por tanto, el rango recomendado está establecido entre los valores [0.35 - 0.50].

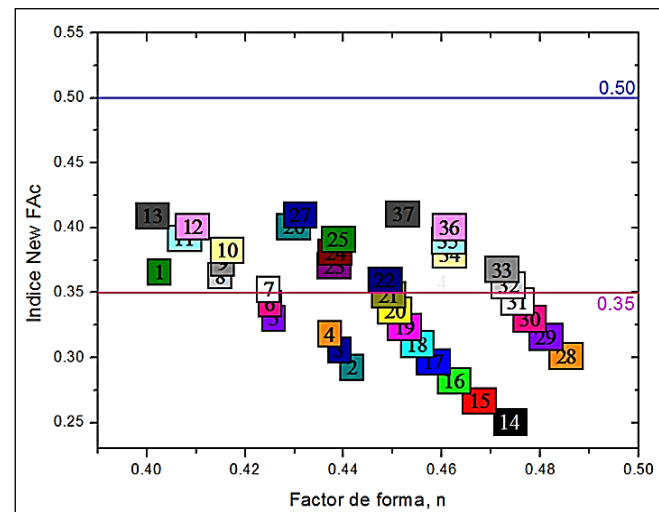


Fig. 6. Gráfico de factor de forma (n) vs índice NewFAc.

En la figura 6, se muestran los resultados del índice

NewFAc obtenido para las 37 combinaciones, asociado gráficamente con el factor de forma (n) de la carta de gradación, además, se trazan los límites del rango recomendado. Existe un grupo importante de 20 gradaciones que plotean dentro del rango recomendado para el índice NewFAc, lo que indica que estas combinaciones cumplen con los criterios de evaluación de la estructura granulométrica según los criterios de empaquetamiento y trabazón. También existe un determinado número de 17 combinaciones que están fuera de este rango, explícitamente por debajo del límite inferior, lo que determina que las mezclas con estas combinaciones de agregados probablemente presentarían elevados valores de VAM.

Para el caso de la combinación utilizada en el diseño de planta, específicamente identificada en la tabla 8 con el numeral 6 (30%Pp, 35%A-P y 35%A), en el análisis de su estructura granulométrica se calculó el índice NewFAc de 0.343 lo que indica que se encuentra por debajo del rango inferior, comprobándose de esta manera valores de VAM ligeramente elevados, tal como se muestra en la tabla 7 de propiedades de la mezcla asfáltica diseñada en planta. El valor de VAM obtenido fue de 16.80%, aunque es mayor a 13% como lo establece típicamente la normativa, es un resultado elevado según recomendación de la NCHRP en su reporte 567, donde sugiere la utilización de $VAM_{m\acute{a}x}$ entre +1.5 a 2% más que el mínimo, con el objeto de evitar mezclas susceptibles a la deformación plástica.

Tabla 10. Combinaciones de agregados que cumplen con los índices de evaluación de la estructura según el método Bailey.

Nro	Coordenadas		Combinación %	Índices Bailey [Rango]	
	n	Dmax		NewCA [0.60–1.0]	NewFAc [0.35–0.50]
1	0.403	16.164	25 – 50 – 25	0.975	0.368
7	0.425	16.790	30 – 40 – 30	0.980	0.350
8	0.415	16.760	30 – 45 – 25	0.980	0.362
9	0.415	16.818	30 – 50 – 20	0.972	0.374
10	0.416	16.887	30 – 55 – 15	0.979	0.384
11	0.408	16.875	30 – 60 – 10	0.978	0.391
12	0.409	16.942	30 – 65 – 05	0.978	0.402
13	0.401	16.950	30 – 70 – 00	0.977	0.410
22	0.448	17.418	35 – 40 – 25	0.978	0.361
23	0.438	17.412	35 – 45 – 20	0.978	0.369
24	0.438	17.476	35 – 50 – 15	0.977	0.380
25	0.439	17.539	35 – 55 – 10	0.977	0.392
26	0.430	17.542	35 – 60 – 05	0.976	0.404
27	0.431	17.615	35 – 65 – 00	0.984	0.408
32	0.473	17.911	40 – 35 – 25	0.977	0.354
33	0.472	17.957	40 – 40 – 20	0.976	0.369
34	0.461	17.972	40 – 45 – 15	0.984	0.380
35	0.461	18.026	40 – 50 – 10	0.975	0.388
36	0.461	18.090	40 – 55 – 05	0.974	0.401
37	0.452	18.114	40 – 60 – 00	0.982	0.411

En la tabla 10, se exhiben las combinaciones conclusivas que cumplen con los indicadores de trabazón y empaquetamiento de la granulometría. Estos resultados se ordenan según la identificación de cada combinación, además se indican las coordenadas de factor de forma (n) y diámetro máximo

($D_{m\acute{a}x}$), los porcentajes de participación de cada pila de agregados así, como sus índices asociados de la evaluación de la estructura granulométrica.

En la figura 7, se presenta la carta de gradación con las combinaciones conclusivas analizadas con indicadores de empaquetamiento y trabazón definidos en el método Bailey. Se plotean las 20 gradaciones que cumplen con los rangos de los índices de evaluación, el ámbito para las mezclas COVENIN tipo III, así como las líneas que definen la relación entre gravas y arenas (G/S). Como se observa, casi todas las mezclas resultantes están por debajo de la línea $G/S=1$, lo que indica que en su estructura granular predominan las arenas.

Particularmente la combinación 36 está sobre la línea $G/S=1$, lo que indica un equilibrio entre las partículas de grava y arena, las estructuras 32 y 33 están ligeramente sobre la línea $G/S=1$, lo que se considera un pequeño dominio en su granulometría de la grava sobre la arena.

Con respecto al eje de las ordenadas ($D_{m\acute{a}x}$), se puede definir un pequeño rango en el tamaño máximo entre 16 a 18mm donde se ubican todas las combinaciones conclusivas, por el contrario, en el eje de las abscisas (n) existe una mayor variabilidad a lo ancho del ámbito normativo.

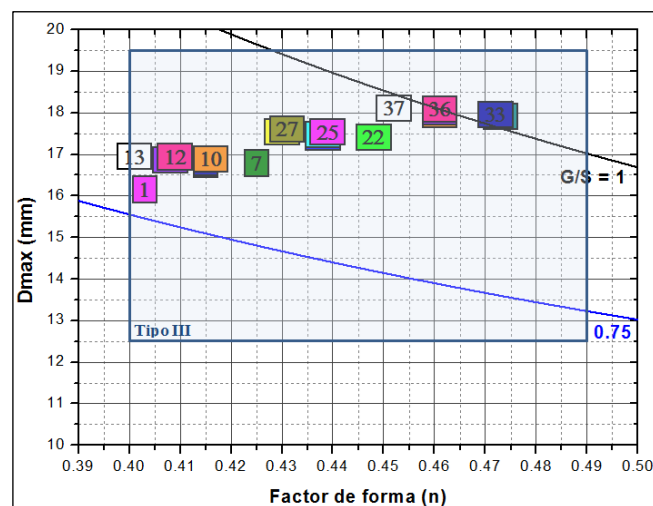


Fig. 7. Carta de gradación con las combinaciones conclusivas del análisis de empaquetamiento y trabazón por el método Bailey.

Es importante tener en cuenta las combinaciones 22 y 37, ya que estas se ubican muy próximas a la línea de máxima densidad ($n=0.45$), por tanto, es posible que estas combinaciones tiendan a producir mezclas con vacíos muy bajos y que pueden ser inaceptables.

5 Conclusiones

En este estudio se demuestra que las herramientas aplicadas como el combinador de agregados del RAMCODES Software, así como los índices de evaluación de empaquetamiento establecidos en el método Bailey, son de gran ayuda para la selección preliminar de la combinación de agregados en un diseño de mezcla asfáltica densa. Aportan alternativas

para la composición de agregados dentro de un ámbito normado, así como indicadores para la evaluación analítica de la estructura granulométrica, con el objetivo de preestablecer mezclas equilibradas con parámetros volumétricos adecuados.

En el análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica prediseñada por la planta y utilizada como referencia, se demostró que los índices del método Bailey son un buen indicador para la evaluación de la granulometría enfocada en la valoración de los VAM de la mezcla asfáltica.

La carta de gradación es una herramienta gráfica con grandes ventajas para la visualización de resultados, así como la utilización de sus coordenadas para la asociación con parámetros como los índices de evaluación de empaquetamiento de la estructura granular.

6 Recomendaciones

La metodología aplicada en el desarrollo de este estudio, puede ser empleada como una alternativa de selección preliminar de la combinación de agregados para posteriormente realizar las experimentaciones de certificación de las propiedades en el diseño de una mezcla asfáltica.

Referencias

- Delgado, H., Garnica, P., Villatoro, G. y Rodríguez, G. (2006). Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. *Instituto Mexicano del Transporte. Publicación*, 299 <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/Publicacion-Tecnica/pt299.pdf>
- Donald, C. y Bonaquist, R. (2006). Volumetric Requirements for Superpave Mix Design. *Transportation Research Board, NCHRP Report* 567. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_567.pdf.
- Graziani, A., Ferrotti, G., Pasquini, E. y Canestrari, F. (2012). An application to the European practice of the Bailey Method for HMA aggregate grading design. *Procedia - Social and Behavioral Science*, 53, pp. 990-999. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812044102>
- Norma COVENIN 2000:1987. (1987). Sector construcción. Especificaciones. Codificación y Mediciones. Parte 1: carreteras. Caracas, Venezuela.
- Norma COVENIN 2000-1:2009. (2009) Norma Técnica Fondonorma. Carreteras, Autopistas y Vías Urbanas. Especificaciones y Mediciones. Caracas, Venezuela.
- Pine, W. y Lum, P. (2009). *The Bailey Method, Achieving Volumetrics and HMA Compactability*. Course Materials and Handouts.
- Salazar, A. y Delgado, H. (2019). Diseño de mezclas asfálticas con el Método Bailey. *Memorias Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto*, XX CILA, pp. 255-265.
- Sánchez, F., Garnica, P., Gómez, A. y Pérez, N. (2002). RAMCODES: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados. *Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica*, 200 <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt200.pdf>
- Sánchez, F. (2007). Gradation chart for asphalt mixes: development. *Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Engineers*, 19 (2), pp. 185-197. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:2\(185\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:2(185))
- Sánchez, F. (2009). *RAMCODES: Metodología de Análisis y Diseño de Geomateriales Compactados. Manual de Aplicación*. Coro, Venezuela.
- Vavrik, W., Huber, G., Pine, W., Carpenter, S. y Bailey, R. (2002). Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design. *Transportation Research Board. Circular* E-C044. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec044.pdf>

Recibido: 05 de enero de 2022

Aceptado: 08 de mayo de 2022

Araujo, Nómar: Ingeniero Civil ULA (2000), MSc en Ingeniería Vial ULA (2016), Profesor Agregado NURR-ULA.



<https://orcid.org/0000-0001-6899-8127>

Castellanos, Jimmy: Ingeniero Civil ULA (1999), MSc en Mecánica Aplicada a la Construcción UCLA (2017,) Ingeniero de Proyectos PDVSA-Occidente. Correo electrónico: castellanosjimmy@gmail.com



<https://orcid.org/0000-0001-7832-2040>