

Recepción: 18 de mayo de 2023

Aprobación: 15 de Noviembre de 2023

APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA RAMCODES EN EL CONTROL DE COMPACTACIÓN DE CAPAS GRANULARES DE PAVIMENTO FLEXIBLE

APPLICATION OF THE RAMCODES METHODOLOGY IN THE
COMPACTING CONTROL OF GRANULAR LAYERS FOR FLEXIBLE
PAVEMENTS

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA RAMCODES NO CONTROLE DE
COMPACTAÇÃO DE CAMADAS GRANULARES DE PAVIMENTO
FLEXÍVEL

Edwin Antonio Guzmán Suárez

Magíster en Ingeniería
Fundación Universitaria Juan de Castellanos
eaguzman@jdc.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-0484-9349>

Juliana Valentina Velásquez Ramírez

Ingeniera Civil
Fundación Universitaria Juan de Castellanos
jvvelasquez@jdc.edu.co
<https://orcid.org/0009-0003-8755-0880>

Laura Catalina Ordoñez Ramírez

Ingeniera Civil
Fundación Universitaria Juan de Castellanos
lordonez@jdc.edu.co
<https://orcid.org/0009-0002-3019-4494>

¿Cómo citar este artículo?

Guzmán-Suárez, EA, Velásquez, J., y Ordoñez, L. (2023). Aplicación de la metodología RAMCODES en el control de compactación de capas granulares de pavimento flexible, *Cultura Científica*, (21). Doi:

RESUMEN

RAMCODES es una metodología para la compactación racional de geomateriales. Entre sus aplicaciones se encuentra la optimización de la resistencia mecánica de las capas granulares de pavimento. Esto se logra mediante la densificación, teniendo en cuenta tanto su grado de compactación como de saturación. El objetivo de este caso de estudio es evaluar los resultados de la implementación de la metodología RAMCODES en el control de compactación de capas granulares de pavimento flexible, al utilizar los datos del proyecto de construcción de la vía de acceso al campus de la Fundación Universitaria Juan de Castellanos (FUJC); para lo cual, se llevan a cabo ensayos de campo y de laboratorio. La verificación del cumplimiento del

requisito de compactación, se realiza bajo los criterios de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras (EGCC) del INV AS (2022). Los resultados de la compactación se analizan al considerar la influencia de las variables que intervienen al generar mapas de resistencia y curvas de diseño del material de afirmado a construir, bajo la premisa de obtener una capa que satisfaga la resistencia exigida por las EGCC. Se concluye que es factible obtener la resistencia mínima bajo distintas combinaciones del grado de compactación y de saturación, tal como lo evidencian las curvas de diseño obtenidas para el material estudiado.

Palabras clave: RAMCODES, compactación, mapa de resistencia, curvas de diseño.

ABSTRACT

RAMCODES is a methodology for the rational compaction of geomaterials. Among its applications can be found the optimization of the mechanical strength of granular pavement layers. This is achieved through densification, considering both their degree of compaction and saturation. The purpose of this case study is to assess the results of the implementation of the RAMCODES methodology in the compaction control of granular layers of flexible pavement, by using data from the construction project of the access road to the campus of the Juan de Castellanos University Foundation (FUJC); hence, both field and laboratory tests are carried out. The verification of compliance with the compaction requirement is carried out under the criteria of the General Specifications for Road Construction (EGCC) of INV AS (2022). The compaction results are analyzed by considering the influence of the variables that are involved in generating resistance maps and design curves of the pavement material to be built, on the premise of obtaining a layer that satisfies the resistance required by the EGCC. It was concluded that it is feasible to obtain the minimum strength under different combinations of compaction and saturation degree, as evidenced by the design curves determined for the material studied.

Keywords: RAMCODES, compaction, resistance map, design curves.

RESUMO

RAMCODES é uma metodologia para compactação racional de geomateriais. Entre suas aplicações está a otimização da resistência mecânica de camadas granulares de pavimentos. Isto é conseguido através da densificação, tendo em conta tanto o seu grau de compactação como de saturação. O objetivo deste estudo de caso é avaliar os resultados da implementação da metodologia RAMCODES no controle de compactação de camadas granulares de pavimento flexível, utilizando os dados do projeto de construção da estrada de acesso ao campus da Fundação Universitária Juan. de Castellanos (FUJC); para os quais são realizados testes de campo e de laboratório. A verificação do cumprimento do requisito de compactação é realizada de acordo com os critérios das Especificações Gerais de Construção Rodoviária (EGCC) da INV IAS (2022). Os resultados de compactação são analisados considerando a influência das variáveis que intervêm na geração de mapas de resistência e curvas de projeto do material cimentício a ser construído, sob a premissa de obter uma camada que satisfaça a resistência exigida pelo EGCC. Conclui-se que é viável obter a resistência mínima sob diferentes combinações do grau de compactação e saturação, conforme evidenciado pelas curvas de projeto obtidas para o material estudado.

Palavras chaves: RAMCODES, compactação, mapa de resistência, curvas de projeto.

1. INTRODUCCIÓN

El método RAMCODES, acrónimo de "Rational Methodology for compacted geomaterials density and Strength análisis", establece un puente confiable entre la teoría y la práctica en el proceso de diseño, control y revisión de extensión de geomateriales compactados en estructuras de pavimentos, sin dejar lugar a las típicas incongruencias que tiene la metodología tradicional. Esto se logra a través de varias herramientas como son: la clasificación cuantitativa, los mapas de resistencia, las pirámides de diseño, los espectros de curva de diseño y los cuadrantes del QA-QC (Sánchez et al., 2002, p. 48).

Con la información recopilada durante el proceso constructivo de la capa de afirmado extendida en la vía de acceso a la FUJC, en este estudio se elaboran mapas de resistencia y curvas de diseño para relacionar la respuesta mecánica de la capa con su grado de compactación, que son el producto de comparar los resultados de densidad obtenidos en campo y en el laboratorio.

Tradicionalmente, se ha exigido un cierto grado de compactación para aceptar una capa de pavimento; no obstante, al aplicar esta metodología, se observa que este criterio no es una razón suficiente, dado que la resistencia final, que es lo que realmente importa, se puede conseguir con otros grados de compactación, si se tiene presente el nivel de saturación de la capa compactada.

De acuerdo con las fases de metodología, en este estudio se realiza la clasificación cuantitativa del material, se genera el mapa de resistencia y se

desarrolla la curva de diseño; sin llegar a implementar la pirámide de diseño y los cuadrantes del QA-QC. El control de calidad, para aceptar o rechazar la capa compactada, se realizó bajo el criterio estadístico tradicional, producto de aplicar la metodología de las EGCC del INV AS. Finalmente, se espera que estudios de este tipo contribuyan a consolidar la aplicación de este método racional en el diseño de geomateriales compactados; es decir, motivar gradualmente la transición desde métodos tradicionales que carecen de soportes técnicos profundos.

2. METODOLOGÍA

La investigación es mixta. Varios autores afirman que los métodos mixtos son una agrupación de procesos empíricos y críticos de investigación, donde se da la recolección y análisis de datos cualitativos y cuantitativos, así como la incorporación conjunta, para realizar inferencias que son un producto de la información obtenida y lograr mayor comprensión del fenómeno de estudio.

1. Ensayos

Para implementar la metodología RAMCODES, se necesita realizar una serie de ensayos al material de afirmado a emplear en la estructura de pavimento. Estos se describen a continuación:

- *Granulometría (INV E-213-13)*

Se realizó este ensayo sobre el material con el fin de conocer la distribución granulométrica, y si esta se acomoda en alguna de las bandas del artículo 311 de las EGCC

del (INV AS, 2022) (Figura 1).

Figura 1. *Ensayo granulométrico*



- *Densidad y humedad de equilibrio (INV E-146-13)* entre estos: pruebas para determinar el límite plástico (LL) y el límite líquido (LP), con cuyos resultados se calcula el índice de plasticidad (IP) (INVIAS, 2013a). Para calcular la densidad y humedad de equilibrio, se realizaron diferentes ensayos estipulados en la INV E-146-13,

Figura 2. *Ensayo de Limites*



- *Clasificación cuantitativa del material*

El sistema de clasificación de suelos RAMCODES tiene la finalidad de categorizar y clasificar, de manera cualitativa y cuantitativa, los materiales de los suelos, para lograr una correlación con respecto a la resistencia y densificación del material compactado.

Para la clasificación del material, se

tiene en cuenta la granulometría y los límites del material a compactar. A partir de estos índices, se obtiene la clasificación del material con finos plásticos con la siguiente ecuación:

$$F_p = (1 + \omega_L) \frac{F}{1 + G} \quad (1)$$

Donde: F_p = Factor característico de suelos o agregados con finos plásticos;

wL = Límite líquido, (0.3082), F = Pasa en tamiz No. 200, (0.136), G = Retenido en tamiz No.4, (0.6) relaciona cualitativamente con la tabla 1. A partir de esta, se obtiene una clasificación del material a compactar como una Grava limosa y arcillosa. El valor del factor característico obtenido para un fino plástico, se

Tabla 1. Fp relacionado con la clasificación cualitativa

Valor Fp	Grupo	Clasificación cualitativa
0.0 - 0.2	RS1	Gravas Limosas y Arcillas
0.2 - 0.5	RS2	Gravas Limosas y Arcillas con Arena
0.5 - 0.7	RS3	Arena Limosas y Arcillosas
0.7 - 1.4	RS4	Arcillas Ligeras Arenosas y Limosas
> 1.4	RS5	Arcillas Francas

Así mismo, se debe conocer la gravedad específica promedio del material (G_{bm}), para lo cual se realiza este ensayo a las fracciones gruesa (G_{bg}), intermedia (G_{bi}) y fina (G_{bf}) de la muestra analizada (INVIAS, 2013b).

Figura 3. Ensayo de gravedad específica



Como complemento, se debe conocer la densidad seca suelta del material (D_L), realizando el ensayo bajo la INV E-217-13 (INVIAS, 2013c) (Figura 4).

Figura 4. Ensayo de densidad seca suelta



• *Compactación Proctor*
modificado (INV E-142-13)

Se realizó este ensayo con tres energías de compactación, 56, 25 y 10 golpes por cada una de las 5 capas en que se dispuso el material en los moldes. En este estudio, se realizaron 3 moldes para la energía de 56 y 25 golpes, y 4 moldes para la de 10 golpes. Este procedimiento para cada energía de compactación se repite, variando el porcentaje de agua a adicionar (Figura 5).

Para el ensayo de compactación, la humedad inicial correspondió a 4 %; en el ensayo con 56 golpes se utilizó un peso de agua adicional para el molde 2 de 204 gr, para el molde 4 de 357 gr y para el molde 3 de 510 gr; en el ensayo de 25 golpes se utilizaron los moldes 5, 6 y 7 con un peso de agua adicional de 255 gr, 408 gr y 560 gr, respectivamente; y para el ensayo de 10 golpes se utilizó un peso de 102 gr, 255 gr, 408 gr y 560 gr para los moldes 8, 9, 10 y 1, respectivamente (INVIAS, 2013d)

Figura 5. *Ensayo de compactación*



- *CBR (INVE-148-13)*

material patrón (INVIAS, 2013e).

Este ensayo se realizó con el equipo disponible en el campus de la FUJC. El procedimiento de ensayo siguió los lineamientos de la INV E-148-13, donde el esfuerzo soportado por el material a diferentes profundidades de penetración, es expresado como porcentaje al ser comparado con el obtenido en un

- *Densidad cono y arena (INV E-161-13)*

En esta prueba se evaluaron 5 abscisas a lo largo de la vía, con el fin de verificar la densidad de la capa en campo (INVIAS, 2013f) (Figura 6). Compactación Proctor modificado (INV E-142-13)

Figura 6. *Ensayo de densidad con cono y arena*

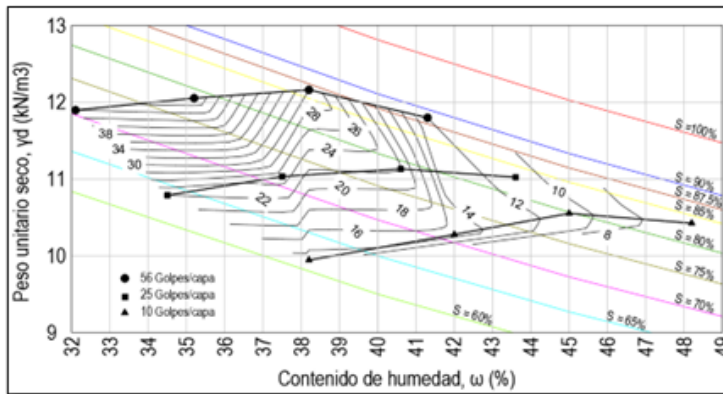


II. Mapa de resistencia

Con el contenido de humedad, densidad seca y CBR, de cada uno de los puntos de las curvas de compactación para las energías de 56, 25 y 10

golpes por capa, se hace un gráfico de contorno (mapa) para representar estos tres factores; en la abscisa (X), se grafica el contenido de humedad; en la ordenada (Y), la densidad seca; y el CBR está representado por isolíneas (Z).

Figura 7. Mapa de resistencia

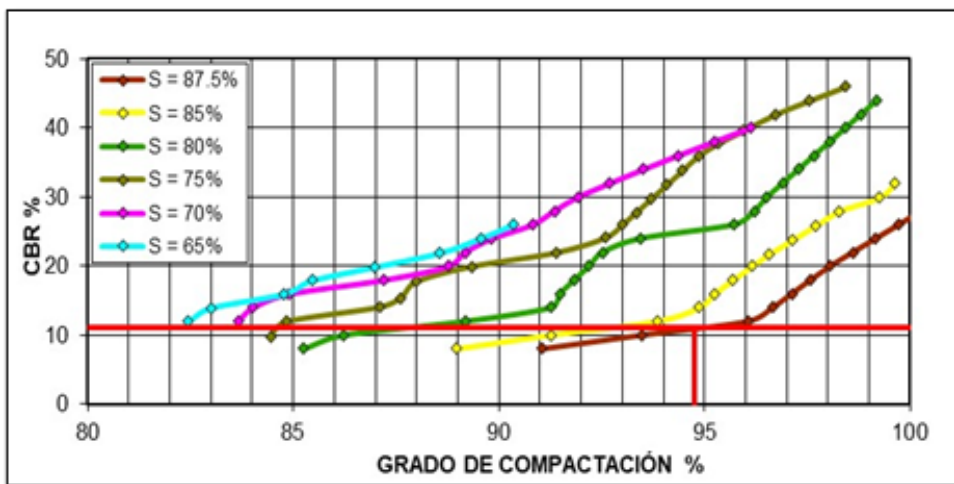


III. Curvas de diseño

Son gráficos que permiten evaluar la influencia de factores, como el grado de compactación (GC) y el grado de

compactación (S) en la respuesta del suelo compactado. La Figura 8 muestra un ejemplo de ellas (INVIAS, 2013f).

Figura 8. Curvas de diseño



3. RESULTADOS

De acuerdo con lo consignado en la metodología, en primer lugar, se

efectuaron los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades índices del material. Los resultados de los ensayos se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Propiedades índices del material*

Propiedad	Valor
G_{bf} Pasa Tamiz No. 40	2.63
G_{bi} Pasa Tmaiz No.4/ Ret No. 40	2.74
G_{bg} Ret Tamiz No. 4	2.82
$G_{bm} = G_s$	2.68
Densidad Seca Suelta, DL (gr/cm^3)	1.387
Límite Líquido , LL (%)	30.82
Límite Plástico, LP (%)	20.20
Humedad, w (%)	4.0

Respecto al ensayo de los resultados de la Tabla 3. compactación y CBR, se obtuvieron

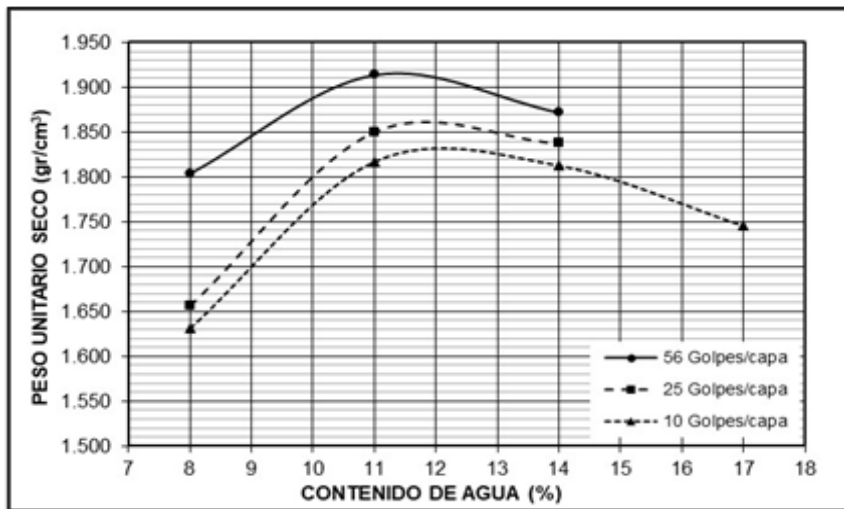
Tabla 3. *Propiedades índices del material*

			CBR %	
w (%)	Golpes / Capa	yd (gr/cm^3)	Sin Inmersión	Con Inmersión
8	10	1.631	27.9	3.2
11		1.818	31.7	
14		1.813	6.9	
17		1.746	3	
8	25	1.657	49.4	8.4
11		1.85	44.6	
14		1.838	6.2	

			CBR %	
w (%)	Golpes / Capa	yd (gr/cm ³)	Sin Inmersión	Con Inmersión
8	56	1.803	106.5	13.4
11		1.914	63.2	
14		1.872	4.3	

La Figura 9 presenta las curvas de compactación.

Figura 9. Curvas de compactación



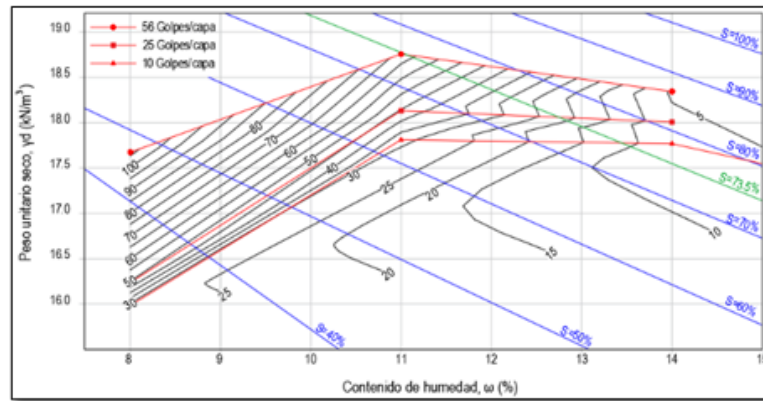
El mapa de resistencia presentado en la Figura 10, se crea a partir de la Figura 9, generando en ella isolíneas con los valores de CBR para cada una de las energías de compactación, junto con las curvas de saturación de 100 %, 90 %, 80 %, 70 %, 60 %, 50 % y 40 %, y la

saturación de 73.5 % obtenida para las condiciones de densidad y humedad de equilibrio, conforme a la INV E-146-13.

Las curvas de saturación se determinan al reemplazar en la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w \cdot G_s \cdot S}{S + (\omega_{sat} \cdot G_s)} \quad (2)$$

Figura 10. Mapa de resistencia



Las curvas de diseño se obtienen de los puntos de intersección entre las curvas de saturación y las curvas de CBR. En estos puntos se leen los valores de peso unitario seco ($\gamma_{d,i}$), y se expresan

en términos de grado de compactación (GC_i) al ser relacionados con el peso unitario seco máximo corregido ($C\gamma_{d,m\acute{a}x}$) del ensayo de compactación.

$$GC_i = \frac{\gamma_{d,i}}{C\gamma_{d,m\acute{a}x}} \cdot 100 \quad (3)$$

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos.

Tabla 4. Grados de compactación

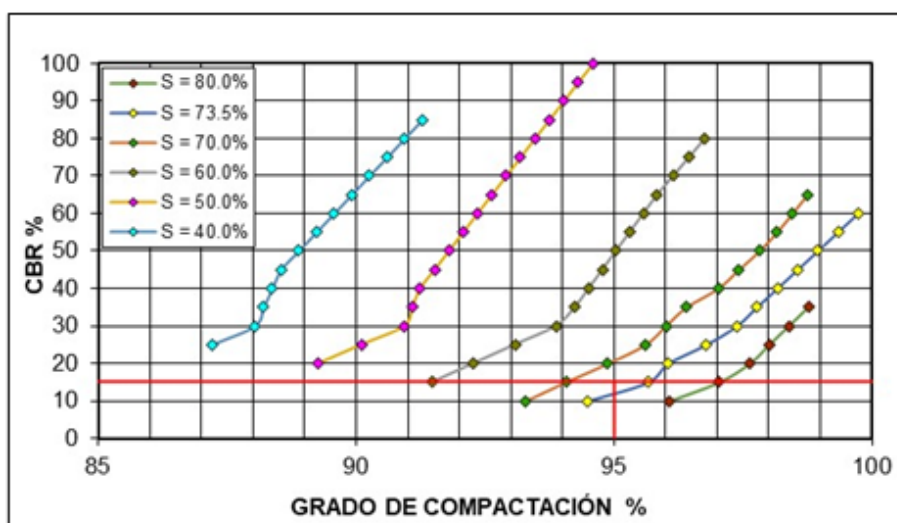
Grado de Compactación, GC (%)						
CBR (%)	Saturación, S					
	80.00%	73.50%	70.00%	60.00%	50.00%	40.00%
5	90.82					
10	96.06	94.48	93.29			
15	97.03	95.66	94.06	91.48		
20	98.01	96.05	94.88	92.28	89.27	
25	98.39	96.79	95.61	93.08	90.1	87.2
30	98.77	97.38	96.01	93.88	90.93	88.03
35		97.77	96.4	94.24	91.09	88.2
40		98.17	97.02	94.51	91.25	88.37

Grado de Compactación, GC (%)						
CBR (%)	Saturación, S					
	80.00%	73.50%	70.00%	60.00%	50.00%	40.00%
45		98.56	97.42	94.78	91.52	88.54
50		98.96	97.82	95.04	91.8	88.89
55		99.34	98.16	95.31	92.08	89.23
60		99.74	98.46	95.57	92.35	89.57
65			98.75	95.84	92.63	89.91
70				96.15	92.91	90.25
75				96.46	93.18	90.6
80				96.77	93.46	90.94
85					93.74	91.29
90					94.02	
95					94.3	
100					94.59	

A partir de los anteriores datos, se realizan las curvas de diseño de la Figura 11, en la cual, además, se ha graficado el valor de resistencia mínimo exigido

para el material de afirmado (CBR \geq 15 %), junto con el grado de compactación mínimo para la capa (95 %).

Figura 11. Curvas de diseño



Luego, por medio del ensayo de densidad utilizando el método del cono y arena, se verificó el grado de compactación de la capa de afirmado extendida, teniendo como referente los artículos 107 y 311 de las especificaciones y la INV E-730-13. A continuación, se muestra los resultados obtenidos:

Tabla 5. Peso unitario seco del afirmado en campo

Ensayo	Lote 1 - Tramo 1			
	yd,i (kN/m ³)	PFG (%)	Cyd,máx (kN/m ³)	GCI (%)
1	17.9	8.4	19.3	92.7
2	17.3	10.1	19.4	89.2
3	18.3	4.5	19	96.3
4	17.1	16.8	19.8	86.4
5	16.1	15.4	19.7	81.7

La aceptación o rechazo del lote se basa en el grado de compactación promedio exigido para la capa

$$GC_I(90) \geq 95\%$$

Es decir, el valor promedio del grado de compactación del lote (GC_I) se debe encontrar sobre el límite inferior del intervalo de confianza, con una probabilidad de 90 %, siendo este resultado mayor o igual a 95 %. Los resultados son los siguientes:

Tabla 5. Peso unitario seco del afirmado en campo

Ensayo	GCI (%) Lote 1	GCM, %	GCI (%) Lote 1	Resultado	GCI (%) Lote 1
1	92.7	N	5		
2	89.2	S	5.63	GCI (90) del lote, %	83.9
3	96.3	P	0.9	GCI (90) mínimo, %	95
4	86.4	k (90)	0.953	Aceptación	NO
5	81.7	GCI (90), %	83.9		
		GCs (90), %	94.6		

A partir de lo anterior, se obtuvo que la curva de saturación de equilibrio (73.5 %) se intersecta con el CBR mínimo exigido para el material (15 %), en un grado de compactación próximo al mínimo exigido (95.6 %). Esta condición indica que la resistencia de la capa de afirmado variará a lo largo del año, satisfaciendo el requerimiento mínimo conforme cambien las condiciones ambientales que inciden en el comportamiento del pavimento.

Las curvas de diseño muestran que el CBR mínimo exigido de 15 % se puede conseguir con un grado de compactación menor al 95 %, por ejemplo, con saturación del material al 60 % o 70 %, para grados de compactación del 91.5 % y 94.7 %, respectivamente. Estos resultados evidencian que es posible optimizar tiempo y costos durante la compactación, al racionalizar el proceso constructivo.

Los ensayos en campo evidencian que la capa de afirmado tenía un contenido promedio de humedad igual a 6.9 %, con una densidad seca máxima corregida promedio de 19.4 kN/m³. Con estos valores y la gravedad específica ponderada (2.68), se estima que la capa compactada presentaba una saturación próxima a 52.5 % durante la prueba de campo; al interpolar entre las curvas de diseño, se determina que el CBR que exhibía el material durante el ensayo era ligeramente superior a 15 %.

Los ensayos de laboratorio muestran que la densidad seca máxima que puede alcanzar este suelo, al ser compactado con una humedad de 11.2 %, es 18.77 kN/m³. La fracción fina del

suelo estudiado indica la presencia de arcillas de alta plasticidad (CL), siendo un material sensible al agua. Los resultados del CBR así lo evidencian, dado que los especímenes fallados con contenido de agua en la rama humedad (superior a 14 %), y los ensayados bajo condiciones de inmersión, exhiben un decaimiento importante en el valor del CBR.

4. CONCLUSIONES

El comportamiento del material se entiende por su matriz de suelo fino, puesto que es un material de alta plasticidad, significativamente susceptible a cambios volumétricos en condiciones de saturación variables; lo que lo convierte en un material considerablemente sensible ante factores ambientales como la humedad generada por las precipitaciones.

Los resultados obtenidos en la capa de afirmado muestran que no se cumple con los requerimientos exigidos por la especificación en cuanto al grado de compactación; sin embargo, al aplicar la metodología RAMCODES, se logra evidenciar que, al analizar las tres variables más importantes en el control de compactación (densidad, saturación y resistencia) en un modelo analítico racional, es posible obtener información acerca del comportamiento del material al tener presente cambios en alguna de sus propiedades según las condiciones que se evalúen, previendo un desempeño adecuado de la capa de afirmado, inclusive sin cumplir a cabalidad con el tradicional requerimiento del grado de compactación mínimo, exigido en las especificaciones de construcción.

Para la optimización del porcentaje de asfalto, esta metodología RAMCODES permite determinar el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica para pavimentos flexibles, logrando garantizar la durabilidad y resistencia del pavimento.

Con los laboratorios realizados y los diferentes procesos elaborados, se pudo notar una mejora de las propiedades mecánicas, obteniendo mezclas asfálticas con propiedades mecánicas mejoradas. Esto incluye la resistencia a la fatiga, la resistencia al gradual y la capacidad de soporte del pavimento.

La metodología RAMCODES permite

un diseño más eficiente de los pavimentos flexibles. Al involucrar a los usuarios finales y utilizar un enfoque iterativo e incremental, se pueden identificar y abordar rápidamente los problemas y requisitos del proyecto.

Con los resultados obtenidos, cabe la posibilidad de optimizar el porcentaje de asfalto y mejorar las propiedades mecánicas de los pavimentos flexibles; en tal sentido, la metodología RAMCODES puede contribuir a la reducción de costos a largo plazo. Esto se debe a una mayor durabilidad y menor necesidad de mantenimiento y reparación.

REFERENCIAS

- Guzmán-Suárez, EA. (2022). *Capítulo II La Subrasante, Diseño de pavimentos*. Fundación Universitaria Juan de Castellanos.
- INVÍAS. (2002). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*.
- INVÍAS. (2013a). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INV E-123.
- INVÍAS. (2013b.). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INV E-128, 222, 223.
- INVÍAS. (2013c). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INV E-217.
- INVÍAS. (2013d). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INV E-142.
- INVÍAS. (2013e). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INV E-148.
- INVÍAS. (2013f). *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. INV E-161.
- Sánchez, F, Garnica, P., Gómez J. y Pérez, N. (2002). *Ramcodes: Metodología racional para el análisis de densificación de geomateriales compactados*. Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt200.pdf>.