

Caracterización de la resistencia de un suelo para la construcción de terraplenes en obras viales.

Characterization of the resistance of a soil for the construction of embankments in road works.

Araujo, Nómara^{1*}; Quintero, Raquel

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

*nomaraaraujo14@gmail.com

Resumen

La resistencia de suelos compactados es una propiedad mecánica relacionada con diversos parámetros y que en muchas ocasiones no depende directamente de solo valores de densidad seca como medida de control de campo, en considerables suelos esta propiedad es compleja de especificar y requiere de un estudio más detallado. En este trabajo se realiza la caracterización de la resistencia de un suelo empleado en la construcción de terraplenes viales, aplicando las herramientas de la Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados, con el propósito de conocer por medio de un enfoque novedoso la respuesta mecánica del suelo relacionada a diferentes variables físicas medibles durante el proceso constructivo, entre ellas, la humedad y el porcentaje de compactación. Se estableció un programa de ensayos de CBR como parámetro de resistencia, con especímenes fabricados con condiciones propias de humedad y energía de compactación definidas por el experimento factorial propuesto, del conjunto de resultados se obtuvieron gráficas de gran valor ingenieril como los mapas de resistencia para la interpretación de la manifestación mecánica del material estudiado y la representación de un espectro de curvas de diseño para la selección del CBR de diseño siguiendo un procedimiento de ponderación y de acuerdo a las posibles condiciones de hidratación asociadas a la ubicación del proyecto.

Palabras clave: resistencia del suelo, compactación, mapas de resistencia, curvas de diseño.

Abstract

The resistance of compacted soils is a mechanical property related to various parameters and that in many cases does not directly depend on only dry density value as field control measures. In considerable soils this property is complex to specify and requires a more detailed study. In this work, the characterization of the resistance of a soil used in the construction of road embankments is carried out, applying the tools of the Rational Methodology for the Analysis of Densification and Resistance of Compacted Geomaterials, with the purpose of knowing, through a novel approach, the mechanical response of the soil related to different physical variables measurable during the construction process, among them, humidity and the percentage of compaction. A CBR testing program was established as a resistance parameter, with specimens manufactured with their own conditions of humidity and compaction energy defined by the proposed factorial experiment. From the set of results, graphs of great engineering value were obtained, such as resistance maps for the interpretation of the mechanical manifestation of the material studied and the representation of a spectrum of design curves for the selection of the design CBR following a weighting procedure and according to the possible hydration conditions associated with the project location.

Keywords: soil resistance, compaction, resistance maps, design curves

1 Introducción

En la construcción de terraplenes viales, es económicamente factible la selección y utilización de materiales locales, estos pueden estar conformados por suelos granulares, finos o combinación de estos, con ciertas particularidades granulométricas y de plasticidad.

Para los suelos categorizados como materiales friccio-nantes, es importante la correlación con la densidad, es decir, se cumple el principio de “a mayor densidad mayor resistencia”, sin embargo, esta correspondencia densidad-resistencia no siempre es directamente proporcional en suelos con sensibilidad a la hidratación como es el caso de suelos cohesivos o con finos plásticos. Los suelos mixtos, en ocasiones conforman una cantidad importante de materiales disponibles a lo largo de un eje de construcción, en muchos casos, la correlación entre los factores densidad, humedad y resistencia es compleja y requiere de un estudio detallado.

Tradicionalmente se ha asociado la resistencia mecánica de un suelo durante un proceso de compactación con valores de humedad y peso volumétrico seco, la normativa venezolana vigente establece referencias como el 95% de la densidad máxima seca obtenida en el ensayo proctor, siendo este un parámetro que en ocasiones dependiendo principalmente del tipo de suelo tiene poca correlatividad con la respuesta mecánica superior del material.

El análisis de características índice de materiales de suelo como la granulometría, clasificación, plasticidad, inclusive la obtención de un valor de densidad máxima seca, humedad óptima y una referencia mínima de compactación, no siempre será garantía para alcanzar los mejores requerimientos de resistencia, muchas veces es necesario realizar una experticia ingenieril de mayor correlatividad, para un mejor diagnóstico y conocimiento de las propiedades mecánicas y de resistencia de un suelo compactado.

En el presente trabajo se plantea un análisis multifactorial para caracterizar la resistencia de un material de suelo localizado a lo largo del eje del proyecto de la futura construcción y terminación del tramo carretero variante vial Puente Momboy-Puente Motatán ubicado al noreste de la ciudad de Valera, Trujillo-Venezuela. La caracterización de la resistencia del suelo para la construcción de los posibles terraplenes viales y movimiento de tierra se evaluará por medio del ensayo C.B.R (California Bearing Ratio), bajo diversas condiciones de hidratación y valores de saturación, con la finalidad de obtener respuestas del suelo ante las posibles variables de diseño. Para ello, se aplicarán los postulados propuestos en la Metodología Racional para el Análisis de la Resistencia de Geomateriales Compactados (RAMCODES), desarrollada por Sánchez L. F. (1998), para diseñar y controlar geomateriales compactados, tales como suelos y mezclas asfálticas.

En este sentido, se propone la aplicación de esta metodología con la idea de optimizar el análisis para el uso racional de los materiales de suelo locales, para obtener productos de mejor confiabilidad y al menor costo posible,

recurriendo a herramientas gráficas que visualizan mejor el comportamiento ante diversas variables, aplicando una técnica novedosa en el análisis y diseño de materiales compactados.

2 Marco Teórico

2.1 Experimentos Factoriales

De acuerdo a la metodología propuesta, estos constituyen una técnica estadística de confección de experimentos específicamente en suelos compactados, para el análisis de variables controlables y no controlables que intervienen en el diseño de un geomaterial compactado, variando al mismo tiempo la humedad del material y la energía de compactación en el rango de trabajo para encontrar las combinaciones de estos factores que maximizan la resistencia.

Es importante según la experiencia de aplicación de este método, que solo es justificable la realización de un experimento factorial en suelos cuya superficie específica de finos sea significativa. Es decir, no se deben aplicar experimentos factoriales a arenas, gravas limpias (SP, SW, GP, GW) o combinación de ellas pues para estos materiales se obtendría el mismo diseño con un experimento factorial que con un experimento de un solo factor.

En la aplicación del procedimiento del ensayo de CBR, no es posible controlar la densidad, pero sí es posible controlar la energía de compactación, se han utilizado energías de 25, 35, 40, 56, y hasta 75 golpes/capa. Una combinación que ha dado los mejores resultados en cuanto a definición y cantidad de ensayos mínima es la de tres niveles con 25, 35 y 56 golpes/capa.

Tabla 1. Guía para obtener valores de contenido de agua (W_{fx} y @) según la clasificación cuantitativa del suelo. Fuente: (Manual de aplicación RAMCODES (2009), pág. 83.)

Clasificación	Rango Fp	W_{fx} (%)	@ (%)
RS1	0.0 – 0.2	6	0.8
RS2	0.2 – 0.5	8	1.0
RS3	0.5 – 0.7	10	1.5
	0.7 – 0.9	12	
RS4	0.9 – 1.1	13	2.0
	1.1 – 1.4	14	
RS5	>1.4	>15	3

Para definir las variables de análisis en un experimento factorial, se debe determinar previamente el factor característico, de manera de poder definir o establecer el nivel de humedad (W_{fx}) que representa la región de inflexión que produce la máxima resistencia. También se especifica además, el valor absoluto de la variación en el contenido de agua (@), para generar los diferentes puntos de humedad del análisis experimental. En la tabla 1, se indica el nivel de

humedad así como su rango de variación recomendada para la elaboración del experimento factorial.

En cuanto al contenido de agua se considera un mínimo de cinco (5) niveles, cada nivel de contenido de agua está referido al de la región de inflexión, tradicionalmente llamado “óptimo” (W_{fx}). El contenido de agua a adicionar a cada nivel está recomendado según la metodología, por valores mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores sugeridos para los niveles de contenido de agua. Fuente: (Manual de aplicación RAMCODES (2009), pág. 83.)

Nivel	1	2	3	4	5
Cont. de Agua	$W_{fx}-3@$	$W_{fx}-2@$	$W_{fx}-@$	W_{fx}	$W_{fx}+@$

La combinación de tres niveles de energía de compactación y cinco valores de humedad resulta en la elaboración de quince (15) especímenes de suelo con el prototipo. En la figura 1, se muestra un resumen gráfico de las combinaciones de los niveles, variación de humedad y energía de compactación para la elaboración de espécimen según la definición integral del experimento factorial inicial.

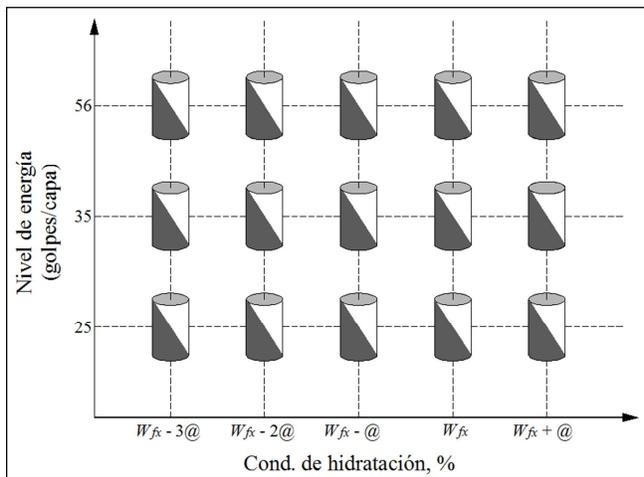


Fig. 1. Combinación de las condiciones de energía de compactación y humedad para especímenes del experimento factorial inicial.

2.2 Mapas de Resistencia

Los mapas de resistencia son una técnica gráfica fundamentada con curvas de contorno a través de las cuales se pueden definir regiones de aceptación de la compactación de campo, basadas en los requerimientos de CBR según el diseño de la estructura de pavimento. Se producen de una técnica estadística llamada experimentos factoriales, y consisten en curvas de contorno de resistencia en el espacio humedad-densidad. Estos gráficos resultan muy convenientes porque relacionan la humedad y la densidad, parámetros relativamente fáciles de medir tanto en campo y laboratorio, con la resistencia, ya que se considera particular para cada suelo.

A pesar de haberse reconocido las ventajas de los mapas de resistencia desde 1950 estos no han sido utilizados extensivamente como parte del diseño y control de suelos compactados. La interacción de los factores que afectan la respuesta mecánica de un suelo puede ser compleja en muchos casos, por tanto, el uso de herramientas gráficas y técnicas de análisis estadísticas son de gran ayuda para valorar su comportamiento con fines de diseño y control en suelos compactados.

En la figura 2, se muestra un mapa de resistencia demostrativo con curvas de contorno definidas por valores de CBR (%) con su región de aceptación en el espacio contenido de agua contra peso unitario seco.

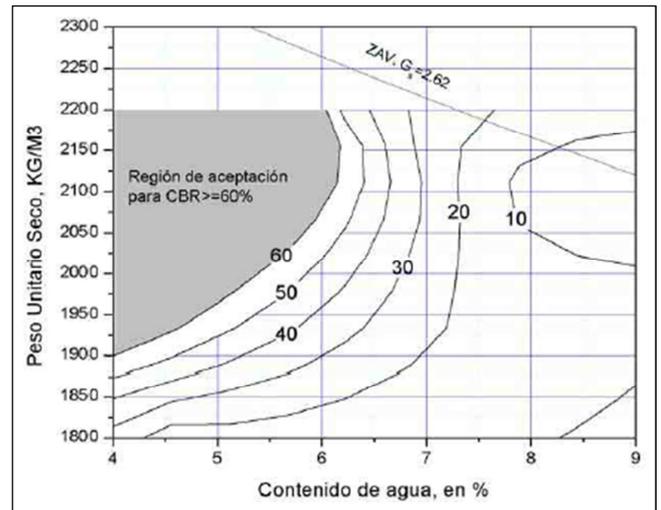


Fig. 2. Mapa de resistencia y definición de la región de aceptación para una arena limosa de Bare-8, Anzoátegui, Venezuela. Fuente: (Publicación Técnica No 200, Ramcodes: Metodología racional para el análisis de densificación y resistencia de geomateriales compactados, Instituto Mexicano del Transporte, 2002)

2.3 Curva de Saturación

La curva de saturación representa la relación entre la humedad-densidad de un suelo en condición saturada ($S_r=100\%$), como puede observarse en la figura 2, la curva de saturación o curva de cero vacíos de aire (ZAV), es función del peso específico relativo de los sólidos del suelo compacto.

Para obtener la curva de saturación es necesario conocer la gravedad relativa de los sólidos del suelo (G_s), y asumiendo diferentes valores de humedad (ω), tales que cubran con suficiencia la rama húmeda, se calculan los valores correspondientes al peso volumétrico seco (γ_d), luego los valores resultantes de esta relación son insertados en el mapa de resistencia constituyendo la curva de saturación (ZAV). La ecuación 1, es aplicada para determinar los valores de densidad seca correspondiente a la curva de saturación.

$$\gamma_d = \frac{(G_s \cdot \gamma_w)}{(1 + \omega \cdot G_s)} \quad (1)$$

Para los suelos no saturados, como es el caso de los suelos compactados, son aplicables manipulaciones algebraicas apropiadamente para obtener alternativamente la ecuación 2, que relaciona la densidad seca (γ_d) en función de variables como la humedad (ω) y para un grado de saturación específico (S_r) menor que 100% Oyola-Guzman (2016).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{\left(\frac{1}{G_s} + \frac{\omega}{S_r}\right)} \quad (2)$$

La ecuación 2, permite trazar familias de curvas para diferentes grados de saturación (S_r), en el espacio correspondiente (γ_d vs ω), tal como se representan en el mapa de resistencia mostrado en la figura 3.

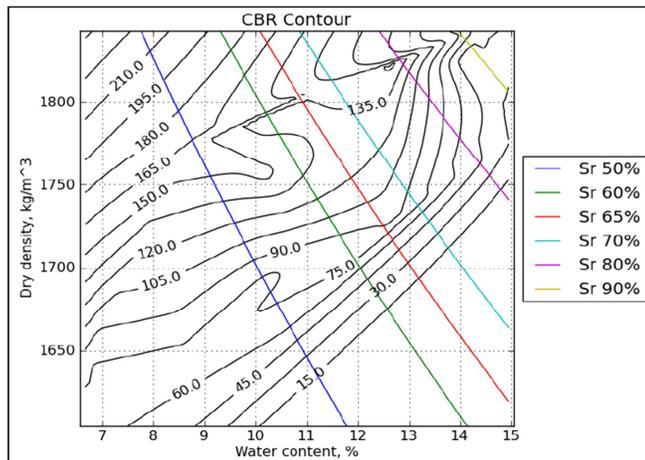


Fig. 3. Intersección de curvas de saturación con las líneas de contorno del mapa de resistencia. Fuente: (Uso exitoso de las herramientas RAMCODES Supertraining, 2011)

2.4 Espectro de Curvas de Diseño

Las curvas de diseño establecen la relación entre el grado de compactación (%C) y el valor de CBR (módulo de elasticidad u otro parámetro de resistencia) para el grado o grados de saturación seleccionados. La relación entre la curva de diseño y la resistencia requerida permite establecer el grado de compactación mínimo, al que debe estar compactado el suelo para alcanzar tal resistencia, en las condiciones de hidratación del proyecto.

La técnica propuesta por RAMCODES para trazar curvas de diseño consiste en intersectar las líneas de contorno (CBR) en un mapa de resistencia con la familia de curvas del grado de saturación (S_r), cuyo trazado se obtiene mediante la ecuación 2. El mapa de resistencia comúnmente usa las siguientes curvas de grados de saturación para realizar las intersecciones de 50, 60, 65, 70, 80 y 90 por ciento. La curva de diseño para un grado de saturación del 100 por ciento se obtiene con resultados de muestras ensayadas

mientras están saturadas (prueba triaxial), o con muestras sometidas durante 4 días de inmersión y ensayadas bajo agua (prueba CBR). Se tiene en cuenta que para ensayar muestras bajo el agua, es necesario desviarse del procedimiento de escurrido de 15 minutos de ASTM D 1883, porque la succión en el espécimen puede aumentar incontrolablemente cuando se sigue dicho procedimiento estándar. Una vez obtenida la información de los puntos de intersección con cada una de las curvas de saturación, se trazan en un gráfico siguiendo la técnica para generar un "espectro de curvas de diseño".

En la figura 4, se muestra la representación de un espectro de curvas de diseño para los diferentes valores de referencia del grado de saturación.

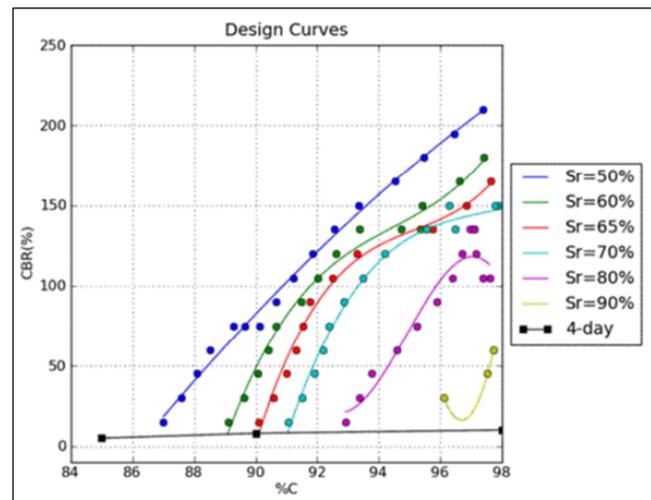


Fig. 4. Espectro de curvas de diseño para un determinado suelo. Fuente: (RAMCODES Method for Compacted Soil Design: Development and Applications, Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges, 2019)

Del espectro de curvas de diseño se pueden realizar tres tipos de diseño del suelo compactado según diversos criterios, a saber, convencional, clásico y AASHTO 1993. El diseño de un suelo compactado por el método convencional el grado de compactación (%C) ya está prefijado por la especificación, típicamente 90 o 95% del proctor modificado. Una vez definida la curva de diseño esta se intersecta con, por ejemplo, el 95% del proctor modificado y se encuentra el CBR de diseño y que se convierte en el CBR del suelo estudiado.

En el diseño de un suelo compactado por el método clásico, el grado de compactación de diseño se establece intersectando la curva de diseño con la resistencia requerida. El rango de selección para el grado de compactación obedece también a razones económicas y técnicas, por ejemplo, si de este procedimiento resulta un grado de compactación de diseño superior al 100% del proctor modificado se comprende que el suelo no es adecuado para el nivel de resistencia requerido porque sería antieconómico tratar de compactar el suelo más allá de ese nivel.

El diseño de un suelo compactado por el Método AASHTO 1993, contempla el establecimiento de un CBR como un promedio pesado de los valores de CBR para hasta tres condiciones de hidratación del suelo durante el año de diseño, a saber: seco, húmedo y saturado. Dicho valor de CBR se calcula a través de la ecuación 3. En el procedimiento RAMCODES se sugiere usar un grado de saturación de 60% para la condición seca, uno de 70% para la condición húmeda, y 4 días de inmersión para la condición saturada.

$$CBR_{diseño} = \frac{N_d \cdot CBR_d + N_h \cdot CBR_h + N_{sat} \cdot CBR_{sat}}{12 \text{ meses}} \quad (3)$$

En la ecuación 3, la variable (N) indica el número de meses del año bajo condición seca (d), humedad (h) o saturada (sat) y depende de la ubicación del proyecto en estudio.

3 Procedimiento Metodológico

La temática del presente trabajo consistió en evaluar detalladamente muestras de material del suelo localizado a lo largo del eje del proyecto para la posible construcción y terminación del tramo carretero variante vial Puente Momboy-Puente Motatán ubicado al noreste de la ciudad de Valera, con el objetivo de caracterizar la propiedad mecánica de resistencia que alcanzará el suelo al ser compactado en la construcción de terraplenes de las obras viales, bajo diferentes condiciones de hidratación y siguiendo un análisis multifactorial como el establecido en los postulados de la metodología de RAMCODES.

3.1 Fase 1: Toma de muestras y análisis de propiedades índice del suelo.

En esta fase preliminar se ejecutó un plan de muestreo de detalle, con el fin de obtener aleatoriamente muestras representativas del material a estudiar. Para ello, se tomaron un número suficientes de muestras en diferentes puntos siguiendo el patrón de muestreo seleccionado. Para todo el estudio propuesto se requirió extraer una cantidad considerable de muestra de aproximadamente 280 kg, con el objeto de ejecutar los diferentes tipos de ensayos requeridos según la metodología aplicada.

Tabla 3. Propiedades índices del suelo

Propiedad	Valor (prom)
Humedad natural (%)	7.9
Gravedad específica de los sólidos	2.653
Límite Líquido (%)	19.2
Límite Plástico (%)	N/P

Se realizaron ensayos de laboratorio para valorar las propiedades índices como: granulometría, humedad, grave-

dad específica de sólidos y límites de consistencia, con el objetivo de clasificar cualitativa y cuantitativamente el suelo. En la tabla 3, se muestran parte de las propiedades evaluadas en esta fase preliminar.

Seguidamente se realizó la clasificación cualitativa del suelo por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) normado por ASTM D-2487 y por el sistema de la Highway Research Board (HRB) normado por ASTM D3282-93/97 y por AASTHO M 145, ambas clasificaciones son empleadas como parte del proceso de caracterización del material. Para esta fase, también se aplican los criterios de clasificación por el sistema cuantitativo de RAMCODES, con el objeto de establecer correlaciones en una escala cuantitativa con propiedades de densificación y resistencia de los materiales compactados, también para analizar la variabilidad del préstamo, aspecto de gran importancia a controlar en obra con grandes movimientos de tierra y que no es posible realizarlo con solo los sistemas de clasificación cualitativo. En la tabla 4, se muestran las distintas clasificaciones aplicadas en esta fase inicial.

Tabla 4. Clasificación del suelo

Sistema de clasif.	Denominación	Descripción
SUCS (Cualitativo)	SP-SM	Arena limosa mal gradada de baja plasticidad.
HRB (Cualitativo)	A-2-4	Arena limosa calificado como un material de excelente a bueno para sub-rasantes.
RAMCODES (Cuantitativo)	RS3 (Fp=0.67)	Arena limosa.

3.2 Fase 2: Diseño del experimento factorial.

Luego de la clasificación cuantitativa aplicada al material en estudio, se tiene un claro conocimiento del factor característico del tipo de material, discriminado principalmente entre suelos con finos plásticos (Fp) y con finos no plásticos (Fnp). En esta fase 2, corresponde la selección del conjunto de valores o parámetros de ensayo para definir el experimento factorial que de acuerdo a la metodología RAMCODES, constituye una técnica estadística de confección de experimentos específicamente en suelos compactados, para el análisis de variables controlables y no controlables que intervienen en el diseño de un geomaterial compactado, variando al mismo tiempo la humedad del material y la energía de compactación en el rango de trabajo para encontrar las combinaciones de estos factores que maximizan la resistencia.

Con el factor característico (Fp=0.67), se establece el nivel de humedad (W_{fx}) que representa la región de inflexión que produce la máxima resistencia, se define además, el valor absoluto de la variación en el contenido de agua (@), para generar los diferentes puntos de humedad del análisis experimental.

Según el índice obtenido de RS3 para el suelo en estudio, se puede estimar según la tabla 1 el valor de humedad correspondiente, por tanto, este parámetro corresponde a $W_{fx}=10\%$ con una variación de $@=1.5$. Sin embargo, por recomendaciones precisas en la propia metodología, es importante el mayor conocimiento del material que se estudia, por tanto, se realizó el ensayo de compactación proctor modificado (AASHTO T180-D) y de la que se obtuvo los valores de humedad óptima y densidad seca máxima. En la figura 5, se puede observar la curva de compactación obtenida, así como los indicadores de humedad correspondiente a la región de máxima densidad seca.

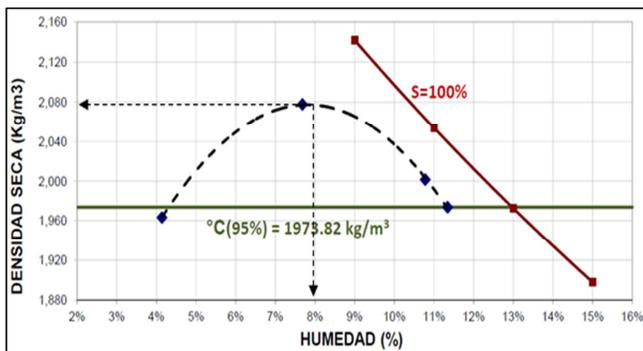


Fig. 5. Curva de compactación del suelo. Ensayos de laboratorio compactación proctor modificado.

De acuerdo con la curva de compactación, el valor de contenido de agua óptimo corresponde a 8% para una densidad máxima seca aproximada de 2080 kg/m^3 . Con estos valores obtenidos experimentalmente se define la secuencia de humedad a aplicar en el experimento factorial de evaluación y para la elaboración de los especímenes para ser ensayados en la prensa de CBR.

Una vez definida la humedad óptima, seguidamente se establecen los 5 niveles o puntos de humedad por cada energía de compactación aplicada. Estos rangos se definen siguiendo las instrucciones de la tabla 2 para un espaciado de $@=1.5$. Consecutivamente se deben seleccionar los niveles de energía, estos se refieren al número de golpes que se deben aplicar por cada capa con el martillo del ensayo proctor, los valores de referencia se corresponden a 12, 25 y 56 golpes por capa, esto debido a recomendaciones propias de la metodología donde se sugiere desplazar a la derecha el rango de humedad y establecer el nivel de energía de acuerdo al ensayo de compactación aplicado, con la finalidad de seguir la tendencia de las curvas de compactación y establecer un mapa de resistencia de mayor información y rangos más amplios de saturación, por tanto, el programa definitivo a realizar para medir el parámetro mecánico de resistencia se establece en la figura 6.

Como se puede observar en el programa definitivo del experimento factorial, se requieren 15 especímenes cilíndricos en un rango amplio de humedad desde 3.5 a 12.5% y para los 3 niveles de energía especificados según el ensayo proctor aplicado. Dichos especímenes son ensayados poste-

riormente en la condición de compactación, con el objetivo de determinar la resistencia del material referida a valores de CBR.

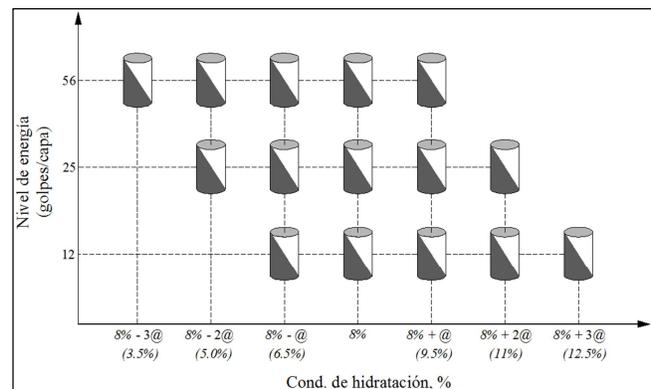


Fig. 6. Programa definitivo para los especímenes de ensayo del experimento factorial.

3.3 Fase 3: Fabricación de los especímenes y aplicación de la prueba de CBR.

En esta tercera fase se fabrican y se ensayan los especímenes de prueba según las condiciones indicadas en el programa de la figura 6. Cada espécimen se ensaya en la prensa en la condición de diseño seleccionada, es decir, en la humedad de compactación para obtener la respuesta de resistencia en tal condición. Para el procedimiento experimental, se recomienda utilizar siempre el mismo molde para hacer los grupos de 15 especímenes, ya que los moldes tienen volúmenes diferentes y pueden generar algunos problemas de sensibilidad.

En la figura 7, se muestra parte del proceso de elaboración de especímenes de prueba según las condiciones de humedad-energía de compactación y también parte de los ensayos en el marco de CBR.



Fig. 7. Fabricación y ensayo de los especímenes de prueba

Además del ensayo de CBR de 15 puntos, se elaboraron tres especímenes adicionales para evaluar el suelo en la condición de saturación por inmersión de 4 días continuos.

4 Discusión y Resultados

Determinados todos los valores resultantes del programa experimental, estos se agrupan siguiendo la técnica sugerida en la metodología, con el propósito de confeccionar mapas de resistencia y espectros de curvas de diseño que caracterizan la resistencia mecánica del suelo.

En la tabla 5, se muestran los resultados de las respuestas de CBR obtenida para los 15 especímenes del experimento factorial. Como el objetivo principal es caracterizar la resistencia del suelo en estudio, se adicionaron tres pruebas de CBR siguiendo la condición de humedad mostrado en la figura 6, para obtener así, un total de 18 puntos en un amplio rango de condiciones de hidratación.

Tabla 5. Valores de CBR para la condición de humedad de compactación.

Energía de compactación (golpes/capa)	Densidad seca (Kg/m ³)	Humedad (%)	CBR (%)
12	1880.33	3.61	15.80
25	1895.57	3.60	20.82
56	1977.08	3.47	24.36
12	1868.13	4.80	16.61
25	1923.54	5.21	21.11
56	2023.59	4.82	31.00
12	1928.08	6.57	15.06
25	1933.74	6.64	18.09
56	2030.62	6.45	25.10
12	1998.02	7.93	13.29
25	2015.85	7.96	16.76
56	2083.70	8.04	20.67
12	1887.92	10.41	11.44
25	1918.58	9.52	11.59
56	2057.98	9.41	12.55
12	1982.34	11.13	3.54
25	1984.23	10.94	3.76
56	1905.25	12.64	1.25

Para la elaboración de los mapas de resistencia en base a resultados de CBR, se utiliza el software Origin de Origin Lab, con una licencia de prueba (Get Started for Free) de 30 días de duración. Esta herramienta nos permite confeccionar el gráfico de curvas de contorno con una gran técnica. Los criterios para el gridding fueron aplicados de forma rigurosa para obtener de esta manera un mapa resultante según los parámetros recomendados por la propia metodología RAMCODES.

Tabla 6. Parámetros estándar para gridding.

Método de gridding	Correlación
Número de columnas	10
Número de filas	10
Radio de búsqueda	2
Suavidad	0.8

En la tabla 6, se especifican los parámetros recomendados para el gridding como un estándar para experimentos factoriales con tres niveles de densidad y cinco niveles de contenido de agua.

En la figura 8, se muestra el mapa de contorno obtenido y que caracteriza la respuesta del suelo en estudio, representada por valores de CBR como parámetro de resistencia en el espacio humedad-densidad.

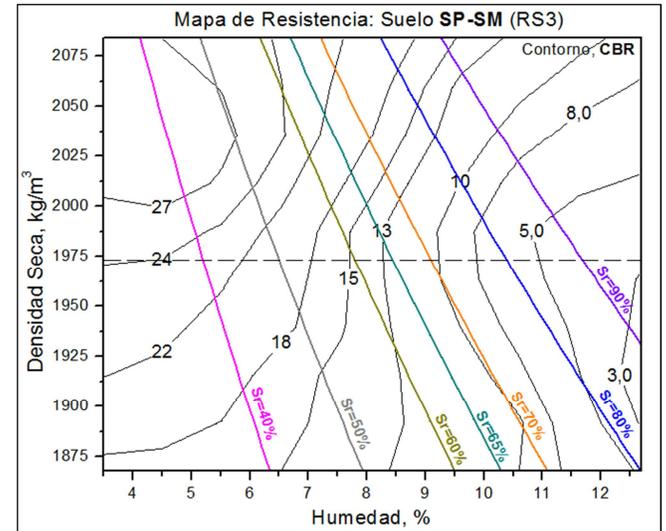


Fig. 8. Mapa de resistencia del suelo en estudio SP-SM (RS3).

En el mapa de resistencia resultante además de las curvas de CBR, se trazan las líneas de saturación (Sr) empleando la ecuación 2 para suelos no saturados como es el caso de suelos compactados. Estas líneas corresponden a valores desde Sr=40% hasta Sr=90%, no se incluyen porcentajes menores ya que en la realidad es difícil encontrar desde el punto de vista práctico porcentajes menores de forma natural a menos que se estudien condiciones extremas.

Además de las curvas de hidratación, se traza la línea horizontal correspondiente a un grado de compactación del 95% en referencia a la normativa venezolana para la construcción de carreteras.

Como se puede interpretar en el mapa de resistencia resultante para el tipo de suelo estudiado (SP-SM), a pesar de tratarse de una arena con una pequeña porción de finos, tal como se detalla en el ensayo granulométrico, este material tiene susceptibilidad a la hidratación, ya que a medida que se incrementa el grado de saturación hay una notable pérdida de resistencia, esto se observa en el decrecimiento de las curvas de CBR con el incremento de los niveles de hidratación. También se puede observar que el potencial máximo de resistencia que pudieran obtenerse con este material bajo condiciones particulares de humedad-densidad-saturación es de un CBR=27%, pero que a medida que se incrementa los niveles de saturación hay una pérdida considerable en el valor de soporte hasta llegar a un 3%.

Según el grado de compactación del 95% establecido como mínimo por las especificaciones venezolanas y tradicionalmente usado en campo como parámetro de control de una “buena compactación”, el mapa nos revela que para este nivel de densidad pueden existir diferentes valores de CBR entre 24 y 5%, lo que indica que no es totalmente correlativo la aseveración de densidad con resistencia, ya que si solo se controla el grado de compactación sin cuidar la variabilidad de las condiciones de saturación del suelo, se estaría incurriendo en un grave error con respecto al valor de diseño de CBR del proyecto.

Tabla 7. Resultados de densidad seca, grado de compactación y CBR para diferentes valores de saturación.

Saturación (%)	Densidad seca (Kg/m³)	Grado de compactación (%)	CBR (%)
40	2004.78	96.4	27.0
	1984.03	95.4	24.0
	1953.37	93.9	22.0
	1908.10	91.7	18.0
50	2059.91	99.0	27.0
	2033.50	97.8	27.0
	2008.98	96.6	24.0
	1990.60	95.7	22.0
	1946.79	93.6	18.0
	1918.02	92.2	15.0
60	2055.71	98.8	24.0
	2025.04	97.4	22.0
	1999.12	96.1	18.0
	1978.80	95.1	15.0
65	1929.82	92.8	13.0
	2046.28	98.4	22.0
	2017.01	97.0	18.0
	2000.52	96.2	15.0
70	1983.06	95.3	13.0
	1938.28	93.2	11.5
	2068.91	99.5	22.0
	2033.50	97.8	18.0
80	2017.01	97.0	15.0
	2003.32	96.3	13.0
	1963.28	94.4	10.0
	1943.93	93.5	9.8
90	2067.94	99.4	18
	2050.05	98.6	15.0
	2034.96	97.8	13.0
	2011.84	96.7	10.0
95	1994.86	95.9	8.0
	1951.97	93.8	6.0
	2076.88	99.9	15.0
	2066.54	99.4	13.0
	2037.76	98.0	10.0
	2022.18	97.2	8.0
99	1995.77	96.0	5.0
	1938.76	93.2	3.0

Con toda la información que aporta el mapa de resistencia, se extraen los valores de densidad y CBR

interceptados para cada línea de saturación, con el objeto de correlacionarlos en un ambiente gráfico en función del grado de compactación y confeccionar el espectro de curvas de diseño del suelo estudiado. En la tabla 7, se agupan los valores ordenados por cada nivel de saturación proyectado en el mapa de resistencia.

En la tabla 8, se presentan los resultados de CBR de las probetas ensayadas bajo la condición de 4 días continuos de inmersión.

Tabla 8. Resultados de densidad seca, grado de compactación y CBR en condición de 4 días de inmersión.

Saturación (%)	Densidad seca (Kg/m³)	Grado de compactación (%)	CBR(4 días) (%)
4 días de inmersión	2070.15	99.5	8.0
	2041.59	98.2	5.0
	1969.84	94.7	2.1

En la figura 9, se presenta el espectro de curvas de diseño para el suelo estudiado, en este ambiente gráfico se correlaciona valores del grado de compactación (%) como parámetro de control y la respuesta mecánica de resistencia que en este caso se relacionó con el ensayo CBR considerando diferentes niveles de saturación, con el fin de suministrar una poderosa herramienta para el análisis, diseño y control de la compactación del suelo en campo.

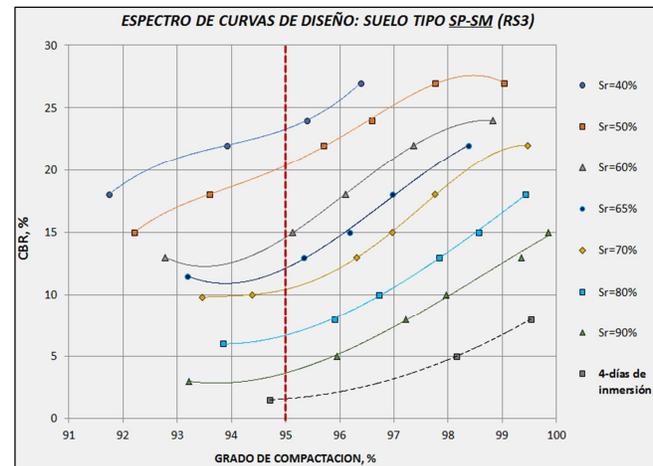


Fig. 9. Espectro de curvas de diseño para el suelo en estudio SP-SM (RS3).

De la figura 9, se pueden realizar interpretaciones de gran valor con respecto a las condiciones del suelo estudiado, por ejemplo, para un mismo grado de compactación como el 95%, existen diferentes valores asociados de CBR según el nivel de saturación evaluado, lo que confirma que en este suelo la densidad no es una correlación directa con la resistencia del suelo, es decir, a medida que se incrementa el nivel de saturación, inclusive para un mismo grado de compactación, hay una fuerte tendencia de pérdida del valor de soporte del suelo.

La herramienta de espectros de curvas de diseño, además de las interpretaciones y correlaciones que pueden plantearse en determinados casos particulares de análisis, simplifica en gran medida la escogencia del CBR de diseño, ya que se pueden establecer valores de CBR dependiendo el nivel de saturación estimado a que estará sometido el material para las condiciones ambientales, permitiendo ponderar con una técnica ingenieril de mayor confiabilidad la variabilidad de la resistencia del suelo en los casos particulares de un determinado proyecto.

Para el caso específico y según de la ubicación del proyecto variante vial Puente Momboy-Puente Motatán, se define la zona climática de acuerdo al mapa de distribución de suelos venezolanos y según la condición de humedad mostrado en la figura 10, empleado comúnmente para el diseño de un suelo compactado en pavimentos según el método AASHTO 1993 aplicado en nuestro país.

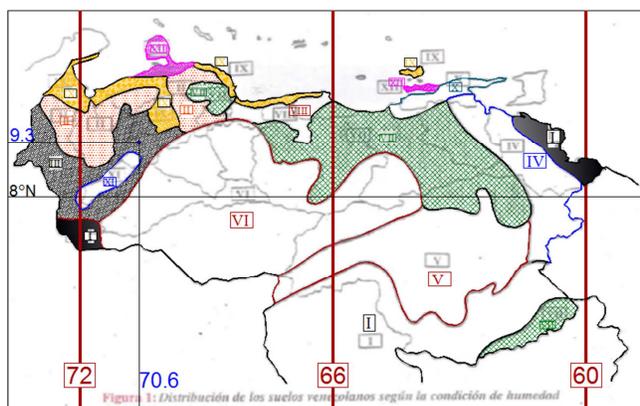


Fig. 10. Distribución de los suelos venezolanos según la condición de humedad. Ref.: Jugo, Augusto: Validación del Método AASHTO-93 para Venezuela.

De acuerdo a las coordenadas de ubicación de este proyecto carretero, se define la zona climática III que especifica 3 meses de estación seca, 3 meses en situación húmeda y 6 meses en la condición saturada, por tanto, estimando para la condición seca un nivel de saturación de $S_r=50\%$, en la condición húmeda un promedio de saturación de $S_r=70\%$ y para el estado saturado asociado al ensayo de CBR a 4 días de inmersión. En la tabla 9, se muestran los valores de CBR para las condiciones de hidratación planteadas.

Tabla 9. Valores de CBR para las condiciones de saturación esperadas en el proyecto variante Pte. Momboy- Pte. Motatán.

Condición	Seca ($S_r=50\%$)	Húmeda ($S_r=70\%$)	Saturada (4 días de Inmersión)
Meses	3	3	6
CBR	21%	11%	2.3

La ponderación del CBR de diseño para la condición climática según a la ubicación del proyecto y para un

mínimo grado de compactación del 95% como referencia y control en obra, se determina por medio de la ecuación 3.

$$CBR_{diseño} (ponderado) = \frac{3 \cdot 21\% + 3 \cdot 11\% + 6 \cdot 2.3\%}{12 \text{ meses}} = 9.2\% \quad (4)$$

$$CBR_{diseño} (En \text{ cond. saturada}) = 2.3\% \quad (5)$$

5 Conclusiones

Tras los análisis de los resultados para la caracterización de la resistencia del suelo usando la metodología RAMCODES en primer lugar se pudo observar en las gráficas de contorno la manera en que decrece el valor de la resistencia a medida que se incrementan los niveles de saturación pese a que se mantienen los mismos valores de densidad, especialmente el 95% de la densidad máxima seca a la que la norma venezolana establece y que es comúnmente adoptada como parámetro de control de compactación. A través del uso de esta herramienta se obtuvo un amplio marco de respuesta con respecto al comportamiento mecánico del suelo.

Se pudo comprobar en el análisis del suelo en estudio una de las premisas de la aplicación RAMCODES que indica “se puede conseguir una igual o mayor resistencia del suelo con un menor porcentaje de humedad” obteniendo como resultado una franca optimización de recursos y tiempo en campo, derivando en un mayor control a favor de las variables fundamentales como son la humedad, la densidad y resistencia al mismo instante, a diferencia de los métodos tradicionales con los cuales solo se controla una de estas variables sin precisar la respuesta de lo verdaderamente importante como es la resistencia del suelo.

Igualmente, los mapas de resistencia y el espectro de curvas pueden utilizarse de forma confiable en la fase inicial de diseño, ya que con estos valores se construye un extenso espacio de respuesta que relaciona importantes parámetros de resistencia y grados de compactación, ampliando la visión analítica del ingeniero al momento de seleccionar un determinado CBR de diseño. Este enfoque permite optimizar el diseño, conduciendo a especificaciones constructivas más eficaces y ofrece una alternativa de análisis de mayor confiabilidad con respecto al tradicional y conservador criterio de ensayar el suelo en la condición saturada como contexto “más desfavorable” de observación.

La aplicación y uso de las herramientas gráficas obtenidas particularmente los mapas de resistencia permiten reflexiones con una mayor experticia ingenieril para comprender los complejos comportamientos del suelo. Con ellos, es posible la observación sincrónica sobre la participación de diversas variables, ya que la respuesta del suelo en muchos casos no depende únicamente de parámetros individuales como la densidad seca o la humedad, sino también de otros factores actuando simultáneamente.

6 Recomendaciones

La metodología aplicada en el desarrollo de este estudio, nos conduce a importantes aportes y sugerencias a tener en cuenta por profesionales, investigadores y constructores como es ser precavidos al usar el criterio establecido por la Norma Venezolana respecto al grado mínimo de compactación del 95% como parámetro de referencia y control, ya que como fue demostrado para este suelo en particular, se puede llegar a incurrir en grandes fallas al no considerar otros factores que intervienen en la respuesta mecánica del suelo.

Referencias

- ASTM D 1557-12. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- ASTM D 1883. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory- Compacted Soils. United States, West Conshohocken, PA, 2007.
- Feo L, Alvarado L, (2012): Uso de Mapas de Resistencia para El Control de Calidad de Construcción de Terraplenes de Suelos Cohesivos". *Foro Seguridad de Presas 2012, Comité Panameño de Presas COPAPRE*. http://copapre.org/copapre/wp-content/uploads/2012/11/Icold_panam%C3%A112-LFeo.pdf
- 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.
- Oyola-Guzman R, (2016), Determinación de la resistencia a la penetración de un suelo cohesivo en diferentes condiciones de hidratación y compactación, *Revista de Arquitectura e Ingeniería*. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6369610>
- 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/Publicacion_Tecnica/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.
- Sánchez, F. (2011). *Supertraining, Uso exitoso de las herramientas RAMCODES*. Coro, Venezuela.
- Sánchez, F. (2019). *RAMCODES Method for Compacted Soil Design: Development and Applications, Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*. https://www.researchgate.net/publication/337445741_RAMCODES_Method_for_Compacted_Soil_Design_Development_and_Applications

Recibido: 02 de febrero de 2024.

Aceptado: 07 de mayo de 2024

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

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

Quintero, Raquel: Ingeniero Civil, Libre ejercicio de la profesión.

Correo electrónico: raquelquintero852@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0008-6290-5477>