



ISSN 0188-7297



RAMCODES: METODOLOGIA RACIONAL PARA EL ANALISIS DE DENSIFICACION Y RESISTENCIA DE GEOMATERIALES COMPACTADOS

Freddy J. Sánchez-Leal
Paul Garnica Anguas
José Antonio Gómez López
Natalia Pérez García

**Publicación Técnica No. 200
Sanfandila, Qro, 2002**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Ramcodes: Metodología racional
para el análisis de densificación
y resistencia de geomateriales
compactados**

**Publicación Técnica No. 200
Sanfandila, Qro. 2002**

Este trabajo fue desarrollado en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte por los investigadores M. en I. Freddy Sánchez-Leal de la Fundación Instituto de Investigaciones Científicas SOLESTUDIOS de Coro, Venezuela; Dr. Paul Garnica Anguas, M. en I. José Antonio Gómez López y M. en C. Natalia Pérez García del Instituto Mexicano del Transporte.

Indice

Resumen	III
Abstract	V
Resumen ejecutivo	VII
Introducción	1
1. Descripción de la metodología	3
1.1 ¿Qué es RAMCODES?	3
1.2 RAMCODES en suelos compactados	3
1.2.1 Clasificación cuantitativa	3
1.2.2 Potencial de densificación	5
1.2.3 Relación entre el contenido de agua, densidad y resistencia	9
1.2.4 Comportamiento no saturado	10
2. Campo de aplicaciones	17
2.1 Anticipación de resistencia	17
2.2 Cuantificación del efecto de la microestructura	18
2.3 Estudio de deformaciones permanentes	23
2.4 Patología de estructuras de pavimento	26
2.5 RAMCODES en mezclas asfálticas	29
3. Conclusiones	43
Referencias	47

Resumen

Se presenta una metodología racional, basada en experimentos factoriales, en conceptos de la Mecánica de Suelos No Saturados, y en la experiencia práctica de diseño y control, para análisis de densificación y resistencia de geomateriales, esto es, suelos, mezclas, y mezclas asfálticas, compactados. Esta metodología, que se comenzó a desarrollar desde 1998 por F.J. Sánchez-Leal, se fundamenta en tres aspectos esenciales, que son: la clasificación cuantitativa, que resume las características de un suelo en un valor numérico único en una escala continua, el potencial de densificación, que estudia la probabilidad de que el geomaterial alcance una densidad en un rango de contenidos de agua, o de asfalto, bajo una energía de compactación particular, y en la relación entre el contenido de agua/asfalto, la densidad, y la respuesta del geomaterial, ya sea de resistencia, deformabilidad, módulos, etc., bajo las condiciones particulares de un experimento. Hasta ahora se han desarrollado tres de las siete fases de la concepción inicial del RAMCODES, por lo que su culminación es un rico campo de investigación, de la cual esta publicación constituye un apoyo fundamental.

Tal como se demuestra en esta publicación, RAMCODES ha demostrado tener aplicación exitosa en el control de la variación de la producción de geomateriales (v.g. mezclas asfálticas), en el diseño, en el control de colocación, y en la revisión de estructuras de pavimentos. RAMCODES relaciona el diseño con el control de campo sin dejar lugar a las típicas incongruencias que tiene la metodología tradicional. A través de cartas de control que resumen especificaciones y conceptos, RAMCODES relaciona la teoría y la práctica de una manera sencilla sin menoscabar la formalidad, permitiendo que el ingeniero común tenga acceso a los conceptos mecanicistas más avanzados.

Abstract

This publication introduces a rational methodology, based upon factorial experiments, Unsaturated Soil Mechanics concepts, and practical expertise of design and control, for compacted geomaterial's (i.e. soils, soil mixes, asphalt mixes) densification and strength analysis. This methodology, developed by F.J. Sánchez-Leal since 1998, is founded on three main aspects, namely: quantitative classification, which resumes soil features into one single numerical value on a continuous scale, densification potential, which studies geomaterial's probability for attaining a particular densification level within a range of water/asphalt content and under particular compaction method and effort, and the relation between water/asphalt content, density, and geomaterial's response under experimentation on strength, deformability, etc. To the date, three out of seven phases that compose initial conception of RAMCODES have been developed. Completion of remaining phases is in consequence a rich field for research to which this publication constitutes a fundamental basis.

As shown in this publication, RAMCODES has shown successful application on several topics those as geomaterial's production variation (e.g. asphalt mixes), design, in place collocation control, and pavement structure revision. RAMCODES relates design and field control activities without typical incongruence permitted by traditional methodology. By means of control charts, RAMCODES links theory and practice on a simple way, but formality is maintained, allowing unspecialized engineers to reach the more advanced mechanistic concepts of material behavior.

Resumen ejecutivo

En esta publicación se presenta a RAMCODES, acrónimo de RAtional Methodology for COmpacted geomaterial's DEnsification and Strength analysis, o Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados. Esta metodología ha sido desarrollada por F. J. Sánchez-Leal desde 1998 en siete fases. La fase uno está dedicada por una parte, a la clasificación de geomateriales (i.e. suelos, mezclas asfálticas, y por otra, a la determinación de su potencial de densificación (Sánchez-Leal, F.J., 2000a, y 2002a). La fase dos trata sobre el estudio de la relación humedad, densidad, y resistencia (i.e. CBR) en suelos compactados (Sánchez-Leal, 2002b). Las fases tres, programada para el análisis de resistencia con equipo sofisticado, y cuatro, programada para el estudio de cambio volumétrico bajo hidratación, todavía no han sido desarrolladas. La fase cinco está dedicada al análisis de mezclas asfálticas (Sánchez-Leal, F.J., 2002c). Finalmente, se está trabajando actualmente en las fases seis, dedicada al desarrollo de un software para facilitar la implementación de RAMCODES, y siete, dedicada al desarrollo de una metodología estadística de control de calidad.

RAMCODES se fundamenta en tres aspectos esenciales, que son: la clasificación cuantitativa, que resume las características de un suelo en un valor numérico único en una escala continua, el potencial de densificación, que estudia la probabilidad de que el geomaterial alcance una densidad en un rango de contenidos de agua, o de asfalto, bajo una energía de compactación particular, y en la relación entre el contenido de agua/asfalto, la densidad, y la respuesta del geomaterial, ya sea de resistencia, deformabilidad, módulos, etc., bajo las condiciones particulares de un experimento.

Según se demuestra en esta publicación, RAMCODES tiene significativas aplicaciones en materia de geomateriales compactados. En el área de suelos compactados, la clasificación cuantitativa permite anticipar comportamientos de densificación y resistencia, lo que facilita las labores de preselección de bancos de material. También, la clasificación cuantitativa, a través de factor característico, sirve como parámetro para evaluar la variabilidad del material de suelo durante la explotación de bancos. Debido a que están fundamentados en un experimento diseñado bajo una concepción factorial, los mapas de resistencia son de gran utilidad en el estudio del comportamiento del suelo, asociando los conceptos de Mecánica de Suelos No Saturados, tales como la trabazón entre partículas, y la succión, a variables que son comúnmente manejadas y medidas en campo y laboratorio, tales como el contenido de agua y el peso unitario seco. Estos mapas se transforman también en cartas de control para garantizar que en campo se compacte el material en las condiciones previstas durante el diseño. Adicionalmente, los mapas sirven para guiar al especialista en estudios de patología para representar los estados del suelo luego de la fabricación de la estructura, y luego de la falla. Una de las aportaciones más significativas de RAMCODES al control de calidad de compactación es demostrar que, con la metodología tradicional basada en el alcance de un nivel mínimo de densificación y en ensayos de CBR bajo hidratación, se cometen serios errores que bien podrían acarrear fallas en las estructuras de

pavimento, o bien podrían cargar al constructor con innecesarios retrasos que redundarían en importantes implicaciones económicas. En mezclas asfálticas, a través de la implementación de mapas de resistencia y de una construcción gráfica original llamada “polígono de vacíos” (Sánchez-Leal, F.J., 2002c) que define un área donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos, la aplicación más significativa es que se demuestra que la metodología tradicional de control de calidad de compactación está divorciada de la metodología de diseño por lo que se estarían aceptando lotes de mezcla asfáltica compactada que en realidad son deficientes y podrían acarrear fallas. La completación de las fases de desarrollo de RAMCODES constituye un significativo campo de investigación en materia de geomateriales compactados, y lo que se lleva desarrollado representa un estupendo fundamento para futuras investigaciones.

Introducción

Control de calidad de la compactación de suelos y mezclas asfálticas implica la realización de acciones orientadas a verificar por una parte que tanto el material como sus condiciones de colocación garanticen el cumplimiento de los parámetros de diseño, y por otra que la variabilidad de los mismos esté por debajo del nivel de riesgo asociado a la obra. En la actualidad y tradicionalmente, los criterios en los que se fundamenta el control de calidad de compactación de obras de tierra es el alcance de un determinado porcentaje mínimo (generalmente 95%) de la densidad máxima seca (id est DMS) de laboratorio según un ensayo normalizado (Próctor Modificado, ASTM D 1557). En los más de los casos interesa que la humedad de campo esté dentro de un rango recomendado para la humedad óptima (i.e. WOP) sólo con el fin de aumentar la probabilidad de obtener altas densidades. En líneas generales el fundamento del criterio control de compactación es la premisa: a mayor densidad, mayor resistencia, y eso es precisamente el resultado de la aplicación de la variante 7.1 del ensayo normalizado de valor relativo del soporte (i.e. CBR) que contempla la penetración de tres especímenes elaborados con distintas energías de compactación, y sometidos a hidratación por un tiempo especificado (v.g. cuatro días). No obstante, estudios tan remotos como Turburn y Foster (1956), Seed (1960), Mendoza (1982), entre otros, y tan recientes como Sánchez-Leal (2002b), coinciden en que la relación entre la densidad, la humedad y la resistencia es compleja y requiere un estudio detallado. La ausencia de un estudio detallado en los criterios actuales y tradicionales para el diseño y control de compactación puede acarrear fallas en los pavimentos.

Por otra parte, en lo que respecta a mezclas asfálticas, metodologías como Superpave demuestran que se ha avanzado mucho sobre aspectos tales como la selección de ligante (relacionado a la temperatura y al tráfico), la selección de la mezcla de agregados (zona restringida, requerimientos consensuales), y la compactabilidad de la mezcla (estando la energía de compactación ligada al tráfico, y el efecto de arrodillado impuesto por el compactador giratorio más en consonancia con los equipos de compactación de campo). Adicionalmente, los especímenes compactados son sujetos a un proceso de envejecimiento de corto término, lo que permite la absorción del ligante por parte de los agregados. A pesar de avances como estos, la práctica de control de campo ha quedado sin cambios, esto es, el control está basado en la densidad final de la carpeta. La práctica actual de control está divorciada del diseño y esto podría llevar a la aceptación de lotes defectuosos, y al rechazo de lotes buenos. ¿Por qué son diferentes las especificaciones de diseño para vacíos con respecto a las especificaciones de control?

El control de la variabilidad de un material de suelo durante la explotación de un préstamo, así como la inferencia anticipada de su potencial de densificación y su resistencia a partir de sus propiedades índices (i.e. granulometría, límites de Atterberg) han sido siempre materia de estudio. No obstante, los sistemas

tradicionales de clasificación de suelos (v.g. SUCS, HRB), basados en las propiedades índice, derivan en una tipificación cualitativa, con lo que no se pueden realizar correlaciones. Así mismo, el estudio de la variabilidad de un material a través de sus curvas granulométricas resulta por demás impráctico, sobre todo cuando se maneja un número grande de muestras.

El nuevo enfoque que presenta este trabajo permite varias tareas. En principio, estudiar de una manera racional la relación entre la humedad, la densidad y la resistencia, y luego derivar en regiones de aceptación para entrelazar el diseño y el control de compactación de campo de una manera eficiente. También, se puede correlacionar el potencial de densificación y la resistencia a través de la clasificación cuantitativa obtenida según el factor característico (Sánchez-Leal, 2000a, 2002a). Finalmente, para mezclas asfálticas, se puede ligar racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control, salvando cualquier incongruencia. Este enfoque corresponde a las fases 1, 2, y 5 de la metodología RAMCODES (Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados), actualmente en desarrollo (Sánchez-Leal, F.J., 1998-2002).

1. Descripción de la metodología

1.1 ¿Qué es RAMCODES?

RAMCODES (propiedad protegida por derechos de autor) es un acrónimo por el nombre en inglés RAtional Methodology for COmpacted geomaterial's DEnsity and Strength analysis. Esta metodología ha sido desarrollada por F.J. Sánchez-Leal desde 1998 en siete fases. La fase uno está dedicada por una parte, a la clasificación de geomateriales (i.e. suelos, mezclas asfálticas); se desarrolló un nuevo sistema de clasificación por medio de un factor característico basado en una escala cuantitativa, y por otra, a la determinación del potencial de densificación, referido al factor característico (Sánchez-Leal, F.J., 2000a, y 2002a). La fase dos trata sobre el estudio de la relación humedad, densidad, y resistencia (i.e. CBR) en suelos compactados (Sánchez-Leal, 2002b). Las fases tres, programada para el análisis de resistencia con equipo sofisticado, y cuatro, programada para el estudio de cambio volumétrico bajo hidratación, todavía no han sido desarrolladas. La fase cinco está dedicada al análisis de mezclas asfálticas y está ayudando ahora a enfrentar la significativa incongruencia entre el diseño y los controles de compactación establecidos por los métodos tradicionales de diseño y control (Sánchez-Leal, F.J., 2002c). Finalmente, se está trabajando actualmente en las fases seis, dedicada al desarrollo de un software para facilitar la implementación de RAMCODES, y siete, dedicada al desarrollo de una metodología estadística de control de calidad.

El objetivo de RAMCODES es el de establecer un puente confiable entre la teoría y la práctica en el proceso de diseño y control de colocación de geomateriales compactados.

1.2 RAMCODES en suelos compactados

1.2.1 Clasificación cuantitativa

La clasificación cuantitativa es uno de los pilares fundamentales de la metodología RAMCODES. La misma consiste en resumir en un solo valor las características índices del suelo que más significativamente afectan su comportamiento; estas características, según Sánchez-Leal, son la proporción granulométrica y la superficie específica de la parte fina.

La clasificación cuantitativa aventaja a la tradicional clasificación descriptiva o cualitativa (i.e. SUCS, HRB) en que aquella permite asociar la tipificación de los materiales a una escala continua, donde, en teoría, para una misma región u origen geológico, cada valor en esa escala representa a un material con las mismas propiedades y respuestas. Las consecuencias inmediatas de esta afirmación es que por una parte se puede evaluar la variabilidad de las

propiedades y respuestas del material a partir de sus características índices, y por otra, se pueden tener varios estudios de propiedades y respuestas para distintas clases de material, con lo que se tendría un banco de datos utilísimo en la anticipación de comportamientos y en la selección de materiales.

Para realizar la clasificación cuantitativa, el autor propuso (Sánchez-Leal, F.J., 2000a, 2002a) el factor característico, F_p , definido como el producto lineal de la proporción granulométrica entre finos y gruesos, y el límite líquido, este último como una medida de la superficie específica de los finos. La expresión propuesta es la siguiente:

$$F_p = (1 + w_L) \frac{F}{1 + G} \quad (1.1)$$

donde:

- w_L : es el límite líquido del material, en decimal
- F: es la fracción que pasa el tamiz #200, en decimal, y
- G: es la fracción retenida en el tamiz #4, en decimal.

El factor característico F_p está asociado a la clasificación descriptiva según la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 F_p relacionado con la clasificación descriptiva (Sánchez-Leal, F.J., 2002a)

Tipo	Rango de F_p	Clasificación
RS1	0.0-0.2	Gravas limosas y arcillosas
RS2	0.2-0.5	Arenas limosas y arcillosas con grava
RS3	0.5-0.7	Arenas limosas y arcillosas
RS4	0.7-1.4	Arcillas ligeras limosas y arenosas
RS5	>1.4	Arcillas francas
RS1*	0.0-0.2	Arenas limpias
RS2*	0.0-0.2	Arenas sin grava

Nota: RS1* y RS2* son suelos sin grava. A pesar de que sus valores de F_p coinciden con los tipos RS1 y RS2, respectivamente, aquellos se comportan de una manera diferente.

El factor característico así definido es sólo útil para suelos llamados “con finos plásticos”, es decir, suelos con límite líquido. El límite líquido es una medida de la superficie específica de los finos del material, y va en proporción directa a su valor. El ensayo con la copa de Casagrande, sin embargo, se vuelve insensible a los cambios en la superficie específica para masas con consistencia representativa de

de límites líquidos por debajo de 20%. Para estimar el límite líquido en estos materiales habría que recurrir a un método indirecto, por ejemplo, al ensayo de "fall cone" de la normativa británica. No obstante, para este trabajo el autor utiliza el ensayo de Azul de Metileno (COVENIN 3548: 1999).

La relación entre el valor azul, V_B , que es una medida de la capacidad de absorción de agua de las arcillas y en consecuencia de la naturaleza de los minerales arcillosos, y el límite líquido, w_L , ha sido evidenciada por autores tales como Lautrin D. (1989). La Figura 1.1, realizada con suelos de varias regiones de Venezuela, sugiere que dicha relación es lineal y que el ajuste podría estar asociado a la región u origen geológico del material. Con información previa de la región geológica del material en estudio se puede conocer el límite líquido equivalente a través del valor azul, en el caso de materiales en que su consistencia no pueda ser detectable por el método de la Copa de Casagrande.

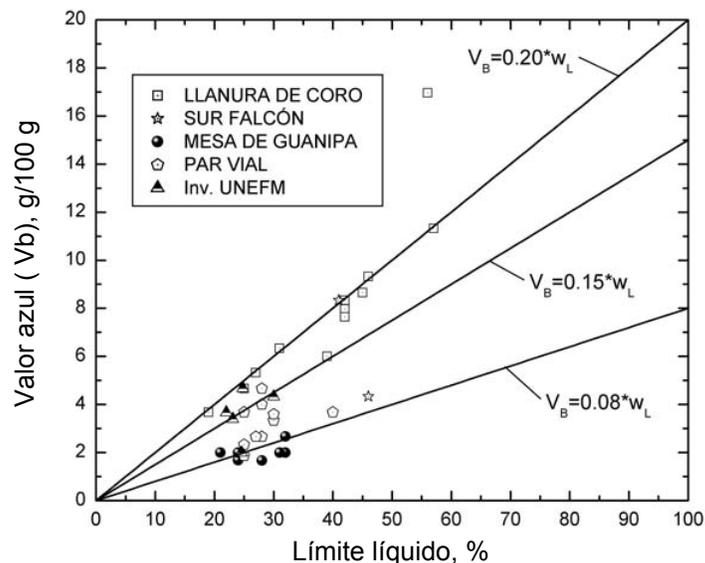


Figura 1.1 Relación w_L vs. V_B . Datos SOLESTUDIOS C.A

1.2.2 Potencial de densificación

El potencial de densificación de un material de suelo se obtiene a partir de la relación entre el contenido de agua y el valor de la densidad seca alcanzada bajo una misma energía y método de compactación desarrollada en un ensayo de laboratorio. Los parámetros de referencia del potencial de densificación son típicamente la densidad máxima seca (DMS), su contenido de agua asociado, llamado óptimo (CAO), así como la forma de la curva que describe dicha relación (*i.e.* curva de compactación).

Varios investigadores en la literatura, entre ellos Murphy (1950), Krebs y Walker (1971), Ingles (1974), Al-Khafaji (1970a, b, 1993), y Saha y Chattopadhyay (1988), usaron los límites líquido y plástico para correlacionar DMS y CAO con materiales en diversas localidades tales como USA, India e Irak. Estos autores presentaron gráficos elaborados para obtener los parámetros del ensayo Proctor por medio de relaciones empíricas asociadas a cada locación. Sin embargo, no es sino hasta recientemente cuando el autor (Sánchez-Leal, F.J., 2000a, 2002a), a través del uso del factor característico F_p obtiene unas sencillas correlaciones lineales con los mencionados parámetros. Las Figuras 1.2 y 1.3 muestran tales relaciones para 84 muestras de suelo de la región geológica Mesa de Guanipa, en el oriente venezolano. En las figuras, los intervalos para F_p coinciden con las descripciones de la Tabla 1.1.

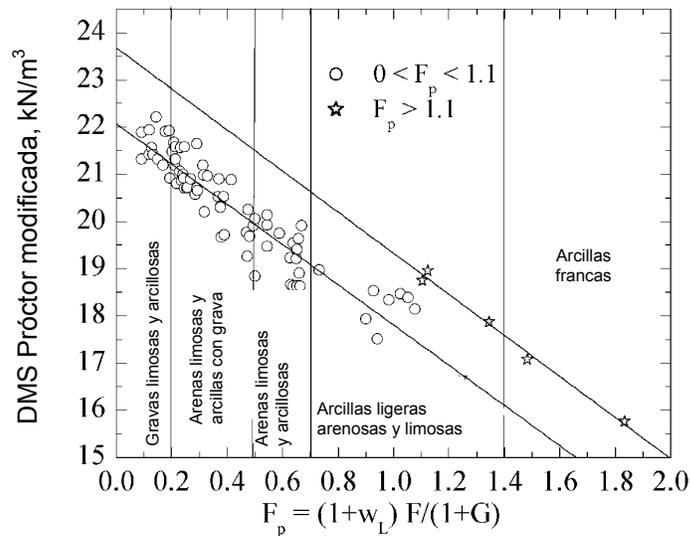


Figura 1.2. Variación de la DMS del Proctor Modificado vs. F_p . (Sánchez-Leal, F.J., 2002a)

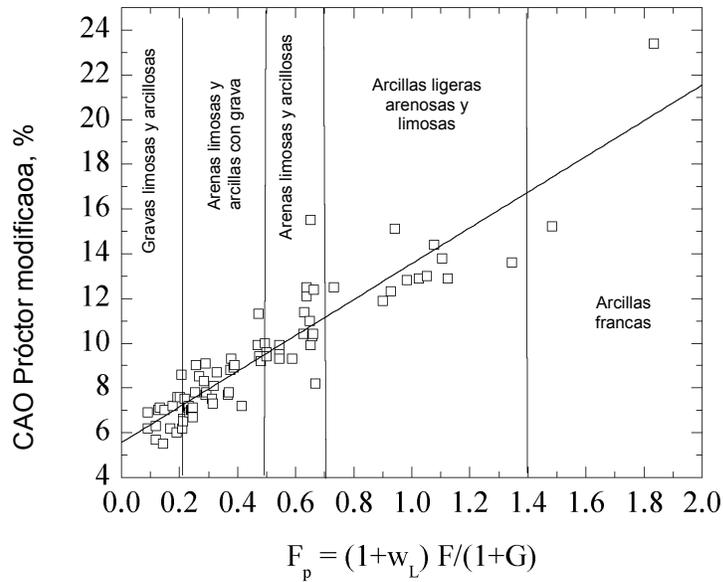


Figura 1.3. Variación del CAO del Proctor Modificado vs. F_p . (Sánchez-Leal, F.J., 2002a)

La Ecuación 1.2 describe la relación entre DMS y F_p ; la Tabla 1.2 resume los estadísticos obtenidos.

$$DMS = A + B \cdot F_p \quad (1.2)$$

Tabla 1.2 Estadísticos de correlación para F_p vs. DMS. (Sánchez-Leal, F. J., 2002a)

Rango para F_p	0.0-1.1	>1.1
A	22.07	23.68
B	-4.26	-4.35
n	79	5
r^2	0.869	0.988
SD	0.43	0.16

Donde:

n: es el número de datos considerados,

r: es el factor de correlación, y

SD: es la desviación estándar para DMS en kN/m^3

La Ecuación 1.3, por su parte, establece la relación entre CAO y F_p obtenida por medio de un ajuste de mínimos cuadrados. Los estadísticos son los siguientes: $C=5.57$, $D=7.99$, $r=0.908$, y $SD=1.03\%$.

$$CAO = C + D \cdot F_p \quad (1.3)$$

Los estadísticos para las expresiones 1.2 y 1.3 describen la variabilidad de los parámetros de densificación de un mismo material. En el caso de la DMS, el rango más probable es de $\pm 0.65 \text{ kN/m}^3$ ($=1.5 \cdot 0.43$) el valor estimado por la Ecuación 1.2. Por otra parte, en el caso del CAO, el rango más probable es de $\pm 1.5\%$ ($=1.5 \times 1.03$) el valor estimado por la Ecuación 1.3. Estos niveles de variabilidad tan significativos son la causa de que, con la implementación de las especificaciones típicas de compactación referidas a un porcentaje de la DMS de laboratorio, se susciten grandes controversias entre Inspectores y Ejecutores.

El potencial de densificación obtenido en laboratorio correlaciona estrechamente con la densificación obtenida en campo por medio de la compactación con equipo pesado de compactación; el siguiente ejemplo, tomado de Sánchez-Leal (2002a) ilustra esta afirmación ya comprobada por investigadores como Turnbull y Foster (1956).

Durante la construcción de las instalaciones del proyecto petrolero Sincor Upstream, ubicado en San Diego de Cabrutica, Estado Anzoátegui, Venezuela, se usaron materiales típicos de la región geológica Mesa de Guanipa para la construcción de carreteras y rellenos. El material de suelo se compactó en capas con espesor variable entre 0.20 y 0.30 m. por medio de equipo pesado de compactación (i.e. vibrocompactadores y rodillos “pata de cabra”, ambos de 6 a 8 toneladas de peso). Se dieron entre dos y tres ciclos de compactación por cada capa. Se tomaron datos de campo (i.e. densidad seca y contenido de agua) en varios lotes terminados usando densímetros nucleares calibrados localmente (Sánchez-Leal, 1998). Adicionalmente, se tomaron muestras representativas de suelo de cada lote y se llevaron a laboratorio para la determinación de sus propiedades índices. El F_p de las muestras estudiadas varió en el rango 0.10-0.80. Los datos para contenido de agua y densidad seca se representaron en las Figuras 1.4, respectivamente. Adicionalmente, se representaron los ajustes descritos en las ecuaciones (1.2), para DMS, y (1.3), para CAO, como franjas de variación con amplitud $\pm 1.5SD$. SD es 0.43 kN/m^3 para DMS, y 1.03% para CAO. Obsérvese en estas figuras cómo los datos de campo verifican con los intervalos predichos por las correlaciones a partir de la información de laboratorio.

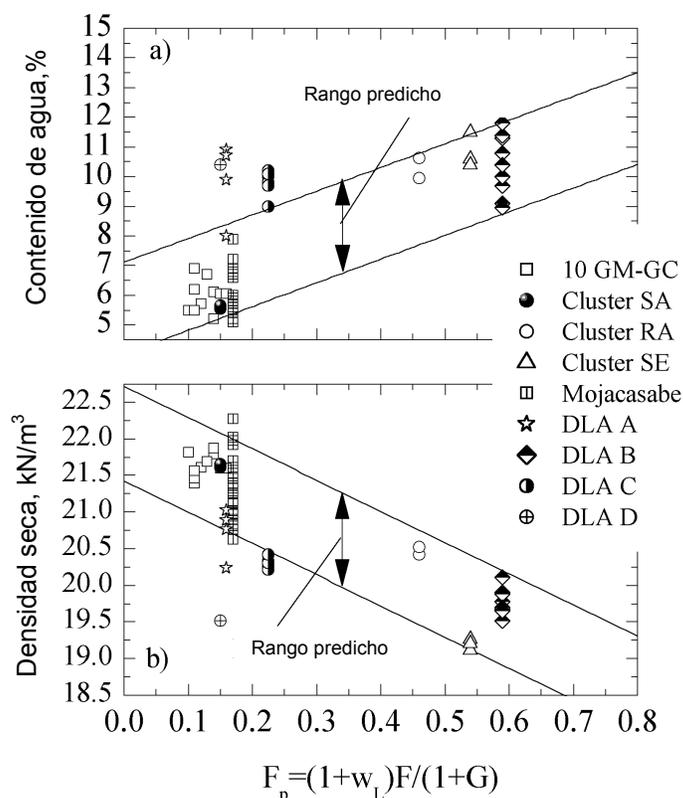


Figura 1.4. Datos de campo versus el rango de variación predicho para a) contenido de agua, y b) densidad seca (Sánchez-Leal, 2002a)

1.2.3 Relación entre el contenido de agua, la densidad y la resistencia

Para la evaluación de la relación entre el contenido de agua, la densidad seca y la resistencia (representada aquí por el CBR), de tanta preocupación por autores como Turnbull y Foster (1956), y Seed (1960), el autor propuso (Sánchez-Leal, F.J., 2002b) los “mapas de resistencia”, definidos como la representación, en gráficas de contorno, de la superficie de respuesta que describe la resistencia del suelo cuando es compactado con un mismo método de compactación en un rango amplio de contenidos de agua y densidades secas (i.e. experimento factorial). La superficie es un ajuste estadístico de los datos de respuesta (i.e. CBR) obtenidos por medio de la aplicación de la variante 7.2 de la normativa ASTM D 1883, que rige el ensayo del CBR para el estudio de la resistencia del suelo en la condición “tal como se compactó”. La Figura 1.5 muestra, con un ejemplo extraído de la literatura (arcilla de Vicksburg, Turnbull y Foster, 1956) la información requerida para el trazo de una superficie de respuesta de CBR. La Figura 1.6 muestra la

superficie de respuesta resultante para la información de la Figura 1.5. Obsérvese en este caso que las respuestas (i.e. CBR) mayores se obtienen para la combinación de bajos contenidos de agua y altas densidades. La Figura 1.7, por su parte, presenta el mapa de resistencias correspondiente a la Figura 1.6; esta representación es más práctica y tiene más ventajas tanto para la explicación de comportamientos como para el control de compactación. Lo primero que resalta es que el lugar de la máxima densificación y su contenido de agua asociado no coinciden con el lugar de la máxima resistencia; luego, está claro que densidad no siempre significa resistencia. La aplicación más significativa de los mapas de resistencia es que se pueden constituir regiones de aceptación para el control de compactación de campo, tal como se muestra en la Figura 1.8.

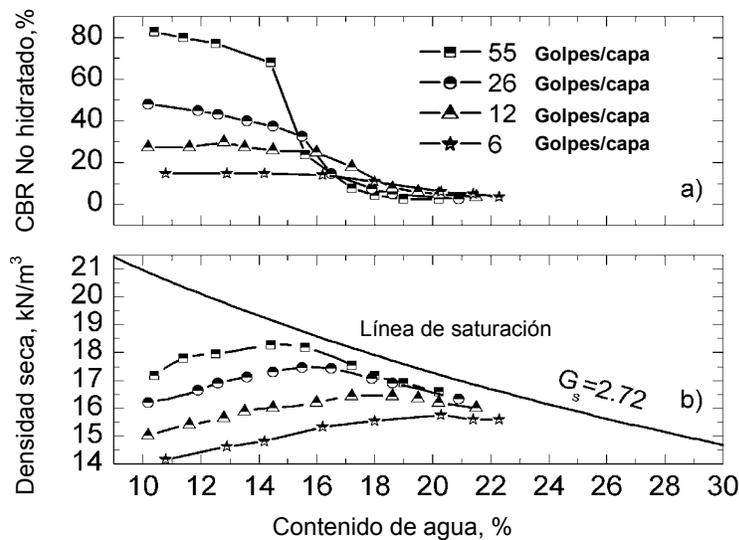


Figura 1.5. Contenido de agua de elaboración vs. densidad seca y CBR para la arcilla de Vicksburg (según Turnbull y Foster, 1956)

1.2.4 Comportamiento no saturado

Un suelo compactado es por definición un suelo no saturado. Su comportamiento de resistencia está influenciado por su estructura y por las condiciones de carga (i.e. patrón, velocidad). La energía y método de compactación proveen al suelo con una estructura particular que es mantenida por el confinamiento (i.e. sobrecarga, restricción lateral), la succión (medida indirectamente a través del contenido de agua y del grado de saturación), y por la trabazón (i.e. ensamblaje entre partículas), última esta asociada directamente con la densidad del suelo. En el ensayo de CBR el confinamiento, las condiciones de restricción lateral, así como la velocidad y tipo de carga están preestablecidas y permanecen constantes durante la prueba. En consecuencia, la respuesta de resistencia de la estructura

conseguida viene dada por la succión y por la trabazón, que en forma práctica son respectivamente el contenido de agua y la densidad, por lo que el mapa de resistencias se convierte en una utilísima herramienta para explicar el comportamiento no saturado. La succión para cada estado (*i.e.* combinación de densidad y contenido de agua) de un suelo arcilloso compactado varía según se muestra en la Figura 1.9. Esta gráfica de contorno es una interpretación estadística de la superficie de respuesta de succión con base en la información presentada por Marinho y Stuermer (2000), y Marinho (2002) para un suelo residual de gneiss ($F=55\%$, $w_L=48\%$, $F_p=0.81$). En la interpretación se supuso que, en términos prácticos, la succión es nula sobre la línea de saturación. Obsérvese en la gráfica que, en este material, la succión crece mientras los estados se alejan en dirección perpendicular a la línea de saturación.

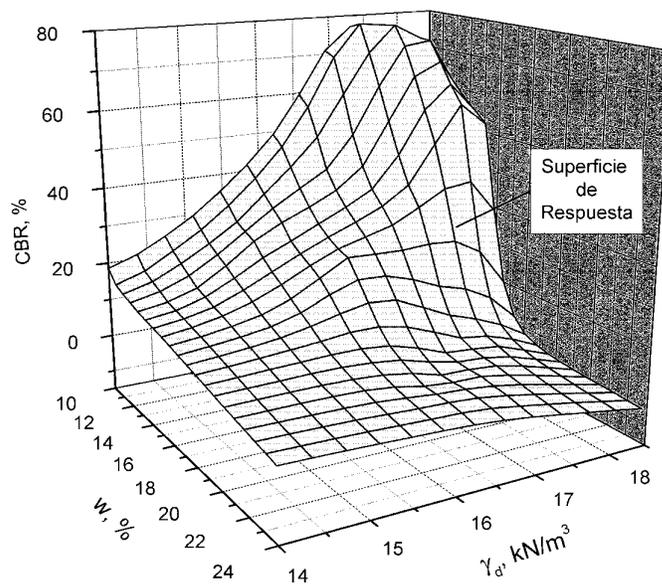


Figura 1.6. Superficie de respuesta para la arcilla de Vicksburg

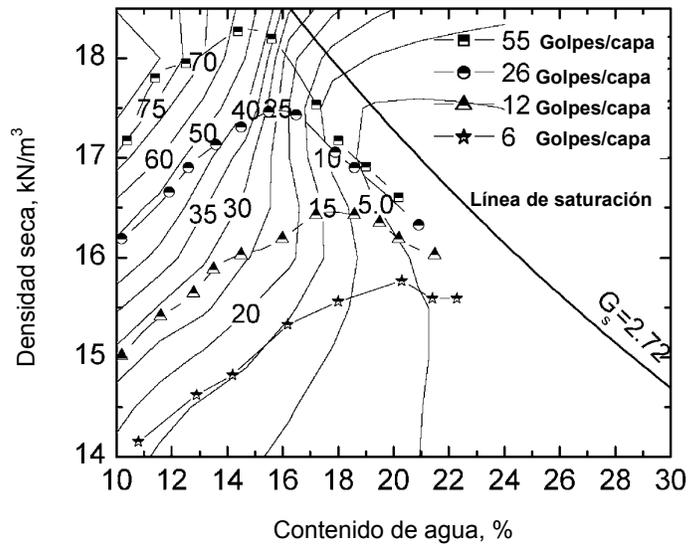


Figura 1.7. Mapa de resistencias para la arcilla de Vicksburg (Sánchez Leal, F.J., 2002b)

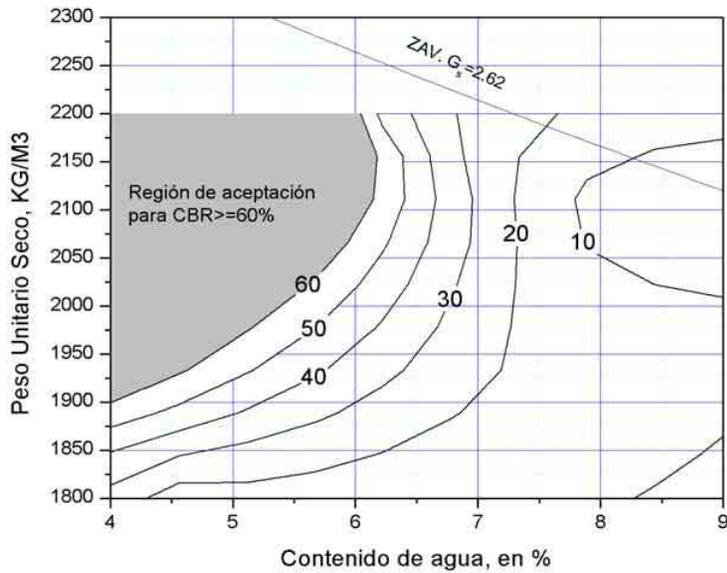


Figura 1.8. Región de aceptación para arena limosa de Bare-8, Anzoátegui, Venezuela

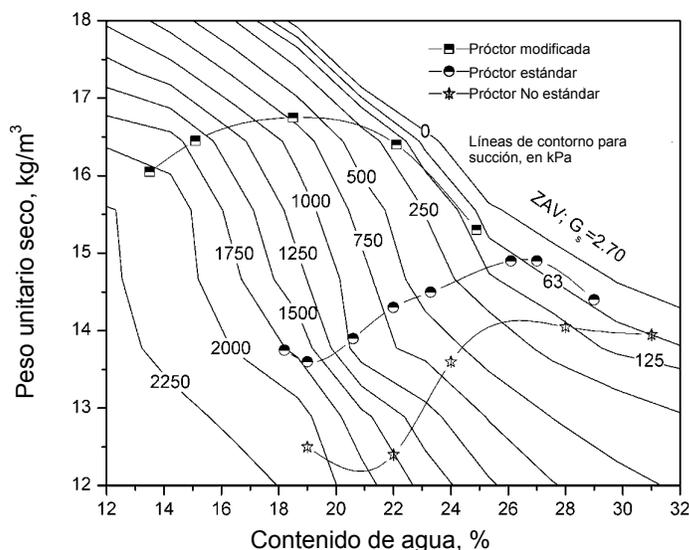


Figura 1.9. Contorno para succión, en kPa (interpretado de la información según Marinho y Stuermer, 2000)

En general, la resistencia aumenta con la succión. No obstante, el potencial de desarrollo de succión es diferente para cada tipo de suelo, de hecho éste varía con la superficie específica de los finos. Por ejemplo, de datos interpretados de la rama de secado varias curvas características presentadas en Escario *et alli* (1989), se tiene que un contenido de agua de 7.5% representa una succión mátrica de 0.5 kPa, en una arena arcillosa, representa 6 kPa en una arcilla arenosa, y representa más de 25 kPa en una arcilla franca. Esta evidencia prueba que el potencial de desarrollo de succión crece con la superficie específica de los finos del suelo.

Debido a que el mapa de resistencias es el producto de un experimento diseñado, se pueden visualizar sobre él las tendencias de crecimiento de la resistencia y la influencia de los cambios de la succión y de la trabazón. La Figura 1.10 presenta el mapa para una arena limosa con grava de Palital, Anzoátegui, Venezuela ($G=14\%$, $F=2.2\%$, $w_L=N.L.$, $V_B=1$, $F_p=0.02$). Obsérvese que las líneas de contorno son casi paralelas entre sí y con respecto al eje de las abscisas. La flecha indica que la tendencia o trayectoria de crecimiento de la resistencia es directamente proporcional al crecimiento de la densidad. Para este suelo en especial, el incremento de la densidad aumenta la resistencia, y los cambios de humedad (*i.e.* succión) muy poco afectan su respuesta.

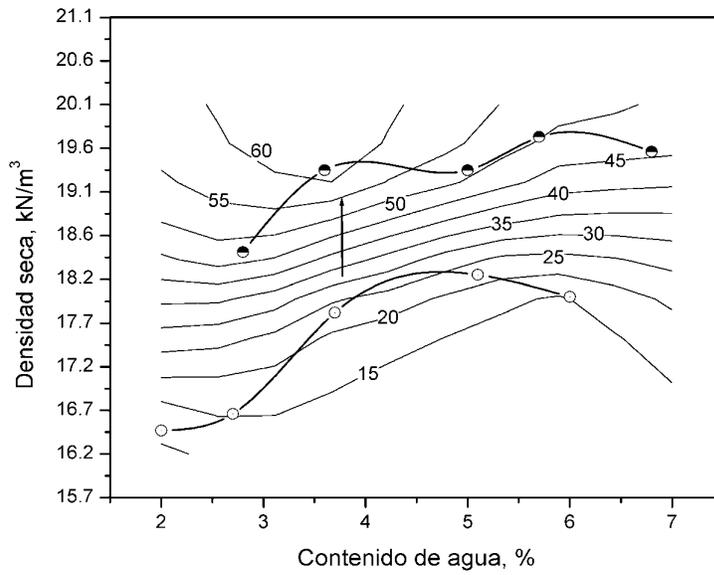


Figura 1.10. Mapa de resistencias para una arena limosa con grava de Palital, Venezuela

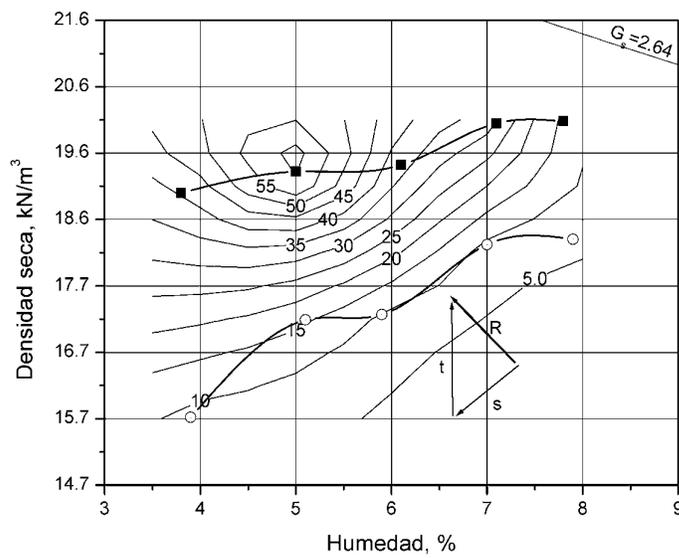


Figura 1.11. Mapa de resistencias para una arena limosa de Barem-3, Venezuela

En la Figura 1.11 se muestra el mapa de resistencias para una arena limosa ($G=0.0\%$, $F=18.9\%$, $w_L=N.L.$; $V_B=1.6$, $F_p=0.23$) de Barem-3, Anzoátegui, Venezuela. Comparativamente con el material anterior, este suelo tiene una mayor cantidad de finos y una mayor superficie específica, lo que se ve reflejado en su mapa de resistencias con líneas inclinadas. Los cambios en el contenido de agua (*i.e.* succión) afectan considerablemente la resistencia. La resistencia, tal como se muestra en la composición vectorial, es la resultante de la acción combinada de la succión y la trabazón.

2. Campo de aplicaciones

A continuación se presentan varias aplicaciones que el autor ha podido tener, en su experiencia como consultor, en temas como la anticipación de la resistencia a partir de la clasificación del suelo, en la evaluación de la relación entre los ensayos sobre especímenes sujetos a inmersión y ensayados en condición tal como se compactó, y en la evaluación del efecto de la microestructura.

2.1 Anticipación de resistencia

Combinando el valor nominal máximo de CBR para las regiones de aceptación, alcanzables para una determinada energía de compactación, con el factor característico, se pueden obtener curvas de anticipación o predicción de la resistencia del suelo compactado, tal como se muestra en la Figura 2.1 para suelos del Estado Falcón y de la Mesa de Guanipa, Venezuela, compactados con energía de Proctor Modificado. La gráfica permite también explicar la influencia de los dos factores que, según el autor, más influyen en el comportamiento del suelo compactado, a saber: la proporción granulométrica y la superficie específica de los finos. La gráfica corrobora que el material de suelo más competente para la estructura de pavimentos es una grava limpia (*i.e.* CBR \approx 100%). A medida que se incrementa el valor de F_p , traducida como la ocurrencia individual o simultánea de los siguientes eventos: reducción de la proporción de grava, y aumento de la proporción de finos, la competencia se va degradando hasta alcanzar el valor más bajo (CBR \approx 35%), para las regiones geológicas consideradas, en $F_p\approx 0.30$. A partir de este punto, el aumento de F_p se produce por el incremento de la proporción de finos y también por el incremento de la superficie específica de los mismos. Granulometría y superficie específica se van combinando de una manera que resulta eficiente en términos de estructura del suelo compactado, con lo que la resistencia comienza a incrementarse hasta alcanzar un máximo (CBR \approx 70%), para $F_p\approx 0.75$, aunque nunca tan alto como para el caso de gravas limpias. A partir de ese punto el incremento de la superficie específica y de la proporción de finos desequilibra la combinación entre los factores mencionados y las estructuras que se van consiguiendo son menos resistentes. De acuerdo al gráfico se tiene que la compactación tiene poco efecto en aumentar la resistencia de suelos francamente arcillosos.

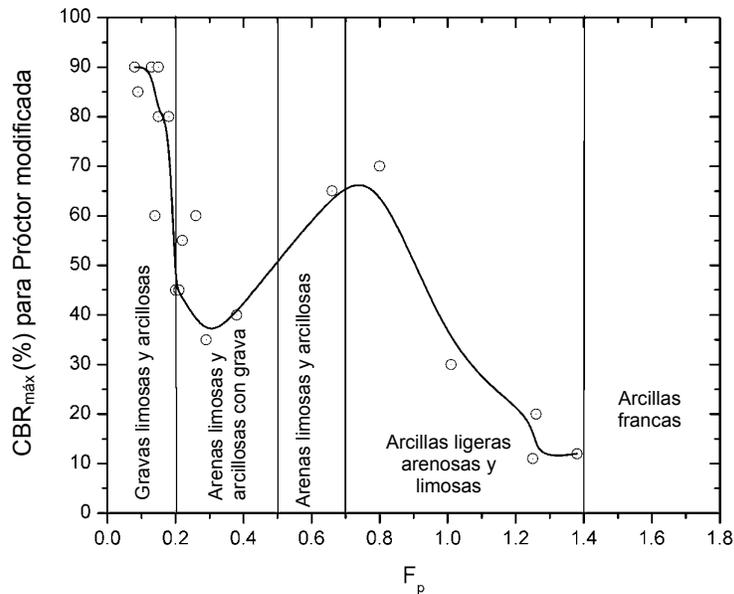


Figura 2.1. Predicción de la resistencia máxima para Proctor Modificado. Suelos del Estado Falcón y de la Mesa de Guanipa, Venezuela

2.2 Cuantificación del efecto de la microestructura

La relación entre las variantes 7.1 (resistencia de especímenes sujetos a hidratación) y 7.2 (resistencia de especímenes tal como fueron compactados) del ensayo de CBR (ASTM 1883) permite evaluar el efecto de la microestructura del suelo compactado. De hecho, no necesariamente un espécimen sujeto a inmersión presentará la misma resistencia en su estado final (i.e. combinación de densidad seca y humedad al final del periodo de hidratación) que un hipotético espécimen elaborado con esa misma combinación de humedad y densidad, ensayado en condición tal como se compactó. En el siguiente ejemplo, publicado por el autor (Sánchez-Leal, 2000b), se ilustra la magnitud que puede tener este efecto.

Durante la investigación de una falla de pavimento de una plataforma terrestre de explotación petrolera en el proyecto venezolano Sincor Upstream se llevó a cabo el siguiente experimento para evaluar la influencia del periodo de inmersión de los especímenes de CBR (variante 7.1) en la resistencia. Se realizaron cuatro (4) ensayos de CBR en muestras representativas. El periodo de inmersión varió entre 0 días (i.e. no inmersión) a 10 días. Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran los datos de caracterización del material de suelo y los resultados de los ensayos de CBR, respectivamente. La fuente de hidratación, y causante de la falla, fue el agua proveniente de la recolección de aparatos de aire acondicionado de los trailers y

otras instalaciones móviles que se descargó directamente en la base durante treinta días a través de una improvisada alcantarilla. El material de suelo de la base fue diseñado originalmente para tener un CBR=40% al 95% de la DMS de laboratorio, bajo una condición de hidratación de 4 días.

Tabla 2.1. Caracterización del material de suelo (Préstamo Axis 410, Mesa de Guanipa)

Características del suelo	Grava arcillosa con arena
Color	Reddish brown
Límite líquido	28%
Índice de Plasticidad	10%
Proporción de grava	41.46%
Proporción de arena	30.38%
Proporción de finos	28.16%
$F_p=(1+LL)F/(1+G)$	0.25
Gravedad específica	2.68
DMS (P. Modificado)	21.37 kN/m ³
CAO (P. Modificado)	6.5 %

Tabla 2.2. Resultados del ensayo de CBR

Condición	Energía compactación (golpes)	γ_d (kN/m ³)*	W _o (%)	W _f (%)	CBR (%)
No inmersión	56	21.25	7.0	7.2	128.0
	25	20.97	7.0	7.0	88.3
	10	19.92	7.0	7.2	54.2
2-días (A)	56	21.27	7.1	7.7	62.0
	25	20.96	7.1	9.0	18.0
	10	19.94	7.1	9.5	15.0
2-días (B)	56	21.14	7.1	6.2	128.2
	25	20.53	7.1	9.3	25.7
	10	19.23	7.0	11.1	15.4
4-días	56	21.22	7.1	8.7	54.8
	25	20.94	7.1	8.3	49.8
	10	19.81	6.9	10.3	28.0
10-días	56	21.13	6.8	7.2	94.0
	25	20.81	6.8	8.6	47.8
	10	19.91	7.1	9.5	11.4

* Los datos originales estaban en kg-f/m³

Tabla 2.3. Valores de CBR para 95%DMS=20.27 kN/m³

Condición	CBR (%)
No inmersión	66.6
2-días (A)	15.9
2-días (B)	24.0
4-días	37.2
10-días	27.2

El valor de CBR para el periodo de 4 días verificó prácticamente con el diseño. A excepción de los resultados para 2 días, los valores de CBR observaron la tendencia esperada para la resistencia de disminuir su valor con el crecimiento del periodo de inmersión. Esta tendencia permite extrapolar que la resistencia para un periodo de hidratación de 30 días podría ser muy baja, lo cual explica la falla del pavimento.

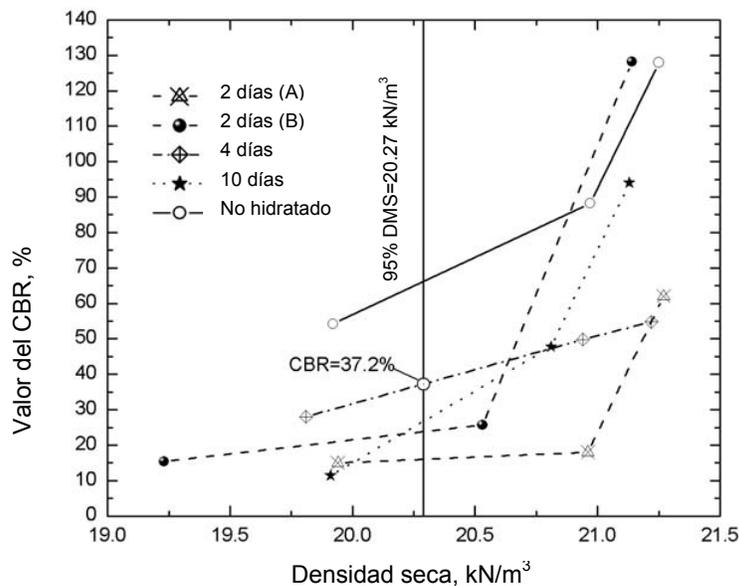


Figura 2.2. Resultados del ensayo de CBR para el experimento con el material del préstamo Axis 410

El experimento para dos días de inmersión se duplicó para asegurar que el ensayo anterior (i.e. "A") no fue por un error humano. El extraño comportamiento para los especímenes de 2 días no puede ser explicado con las técnicas tradicionales de análisis. RAMCODES, sin embargo, lo puede explicar. La Figura 2.3 muestra el mapa de resistencias para el material del Axis 410.

Tabla 2.4 Resultados de CBR para el material del Axis 410 ensayado en condición tal como se compactó.

Energía de compactación	w (%)	γ_d (kN/m ³)	CBR (%)
Modificado	6.1	20.83	97.7
	7.3	20.98	68.4
	7.5	20.99	31.5
	9.3	20.21	11.8
	9.7	20.31	15.0
Estándar	6.0	18.81	47.7
	7.0	19.36	40.7
	8.0	20.34	35.0

Los estados iniciales y finales para los ensayos de CBR bajo condición de inmersión se representaron en la Figura 2.4. Al lado de los puntos representativos de los estados finales se colocó el valor de CBR entre paréntesis. Obsérvese en la figura que la cantidad de hidratación en el suelo no puede ser controlada en el ensayo de CBR, así que las conclusiones basadas en esta variante bien podrían ser incorrectas.

La Tabla 2.5 resume los valores de CBR para la condición hidratada obtenidos de la Tabla 2.2, y los valores de CBR, para la condición tal como fue compactado, leídos del mapa.

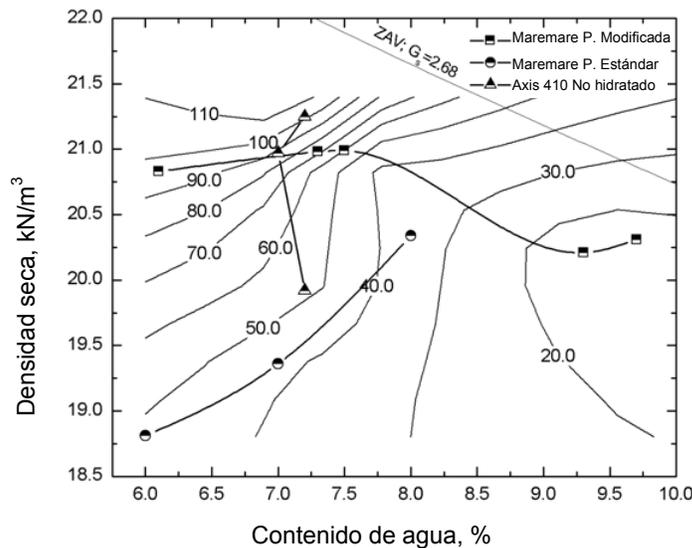


Figura 2.3. Mapa de resistencias para condición tal como fué compactado. Material del préstamo Axis 410

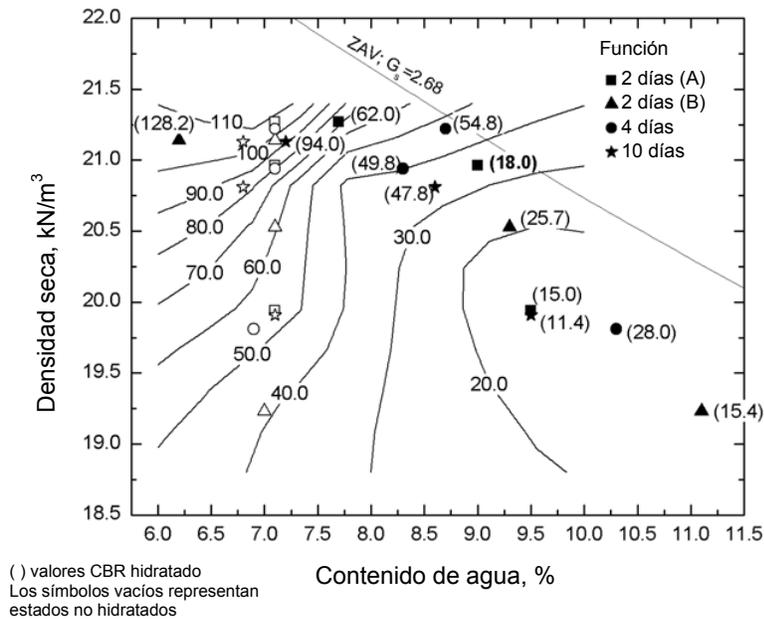


Figura 2.4. Resultados de CBR hidratado graficados en el mapa para condición tal como se compactó

Tabla 2.5. Valores de CBR de la Figura 2.4

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hidr	62	18	15	26	128	50	55	94	11	48
No Hidr	70	35	10	21	105	40	45	90	10	35

Los valores de la Tabla 2.5 se contrastaron en la Figura 2.5 para evaluar el efecto de la microestructura. El ajuste indica que los valores de CBR no hidratado son el 88.5% de los valores de CBR sí hidratado, para el mismo estado (i.e. combinación de contenido de agua y densidad). El autor piensa que mientras aumenta el valor de F_p , mayor es la influencia de la microestructura del suelo compactado, de modo que se espera que para una arcilla la relación entre CBR no hidratado y CBR hidratado será inferior a 88.5%, y para una arena limpia, por ejemplo, será superior, tal vez aproximadamente igual a la unidad; aunque esto debería comprobarse con experimentación.

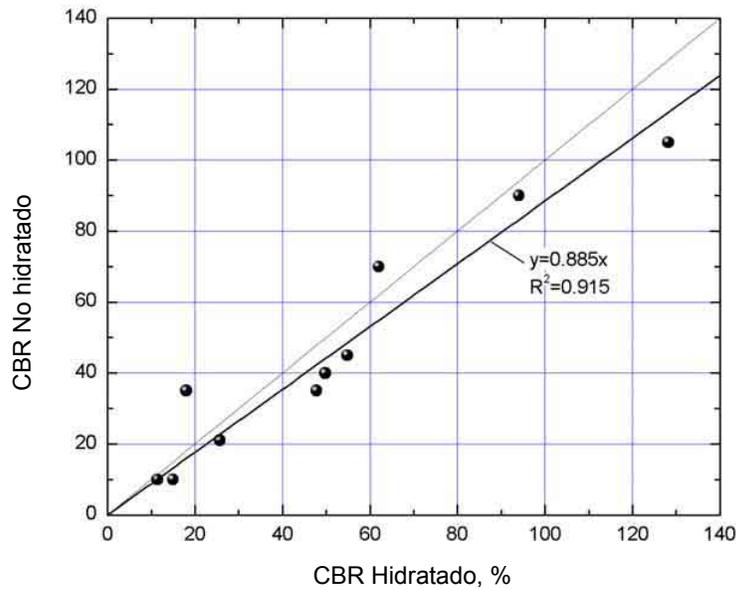


Figura 2.5. Efecto de la microestructura en la resistencia del suelo compactado

2.3 Estudio de deformaciones permanentes

RAMCODES resulta de gran asistencia en la investigación del comportamiento del suelo, tal como se demuestra en la interpretación de la información presentada en un estudio de la influencia de la plasticidad en las deformaciones permanentes producidas en un suelo compactado, publicado por el Instituto Mexicano del Transporte (Garnica, P., y Pérez, N., 2002). En el mencionado estudio se realizaron ensayos para la determinación del módulo de resiliencia en laboratorio según el Protocolo P46 de la AASHTO, utilizando una cámara triaxial para aplicar carga en forma de onda semi-senoidal con una duración de aplicación de 0.1 s y un tiempo de retardo de 0.9 s. Se ensayaron un total de siete (7) suelos finos de la ciudad de Querétaro, México, mismos que se identifican en la Tabla 2.6.

Para cada suelo se elaboraron especímenes variando el contenido de agua, bajo energía de compactación de Próctor Estándar. Los ensayos triaxiales se ejecutaron sobre los especímenes en la condición “tal como se compactó”. Al analizar la variación de la deformación permanente en cada espécimen, luego de la aplicación de las cargas, con respecto al grado de saturación, se encontró que los suelos R4 presentaron una mayor deformación permanente que los suelos R5, para un mismo grado de saturación (ver Figura 2.6), es decir, para estos suelos

finos, mientras mayor es F_p , menor es la deformación permanente que se espera. En la gráfica de iso valores de deformación permanente mostrada en la Figura 2.7 se demuestra como en los suelos finos este parámetro está influenciado prácticamente sólo por el contenido de agua (i.e. succión), pues la densidad (i.e. trabazón) tiene muy poca influencia. Mientras mayor es el F_p , mayor es la superficie específica de los finos, y por tanto se espera que los niveles de succión desarrollados sean más elevados, de allí su menor deformabilidad. Obsérvese que esta interpretación no se puede realizar tomando como base en la clasificación SUCS.

Tabla 2.6. Propiedades de los suelos estudiados

Sitio	w_L	F	G_s	SUCS	F_p	Tipo
Hacienda Valle Verde	44	95	2.54	CL	1.37	R5
Arboledas	74	95	2.53	CH	1.65	R5
Comercial Mexicana	33	57	2.57	CL	0.76	R4
Central de Autobuses	44	82	2.62	ML	1.18	R4
Conдумex	76	78	2.76	CH	1.37	R5
Los Olivos	63	95	2.67	MH	1.55	R5
Aeropuerto	54	93	2.60	MH	1.43	R5

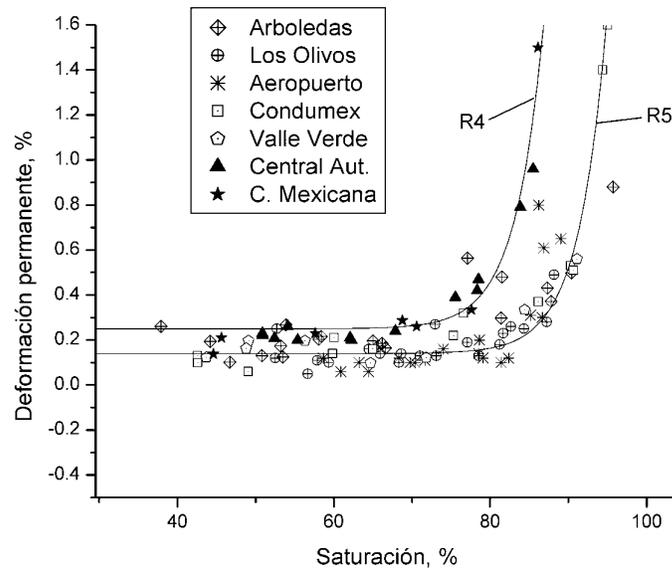


Figura 2.6. Evaluación de la deformación permanente en suelos finos compactados (Garnica, P. y Pérez, N., 2002)

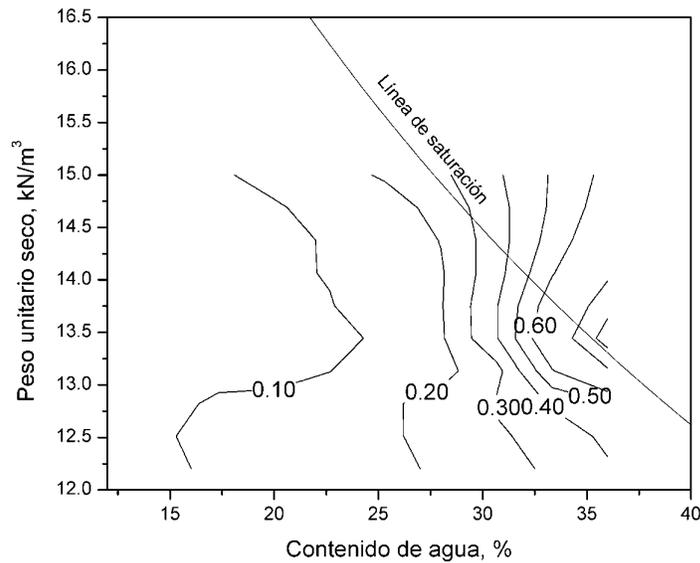


Figura 2.7. Iso-valores de deformación permanente, en %, para un suelo fino compactado (de Garnica, P. y Pérez, N., 2002)

2.4 Patología de estructuras de pavimento

RAMCODES es una poderosa herramienta en los estudios de patología. El siguiente ejemplo está tomado de un proyecto petrolero en el oriente venezolano donde se produjeron fallas (i.e. deformaciones excesivas) en la estructura de pavimentos de una plataforma terrestre de explotación durante las operaciones de prospección inicial. Las deformaciones se produjeron en el área de operaciones (i.e. la más cargada por vehículos), durante la temporada de lluvias, pese a que la infraestructura estaba dotada de un eficiente sistema de drenajes, y el nivel freático medido durante el periodo de lluvias tenía una profundidad superior a los 10 metros.

Debido a que se comprobó que la estructura de pavimentos estaba adecuadamente diseñada y construida, surgió la hipótesis del debilitamiento de los materiales de base y subbase debido a la hidratación. La Figura 2.8 muestra el modelo de hidratación más aceptable para explicar el origen de las fallas. Los "cellars" son unos cajones cúbicos de concreto de 1.5 m de lado que tienen una perforación circular en el fondo a través de la cual pasan las mechas y tuberías de explotación de yacimientos. Los cellars están ubicados en el área de operaciones donde, por razones de estabilidad de los taladros (i.e. oil rigs), la pendiente de la superficie es nula. Durante las lluvias los cellars se convierten en considerables reservorios de agua, desde donde esta se infiltra al suelo conformando temporales niveles freáticos colgantes (ver Figura 2.7). Los materiales de subbase y base de la estructura de pavimentos se hidratan por ascensión capilar desde el nivel freático. Este hipotético modelo fue confirmado con una detallada prospección geotécnica.

El material de base es un R2 con $F_p=0.25$, y el de sub-base es un R3 con $F_p=0.55$; en la prospección patológica y en los registros de fabricación de la plataforma, se identificó también un material R2 con $F_p=0.38$, en la estructura de pavimentos; su origen probable es la mezclas de los materiales de base y subbase ocurrida durante el proceso constructivo. Las Figuras 2.9, 2.10 y 2.11 muestran los mapas de resistencia (i.e. CBR) para cada uno de estos materiales; en estos mapas se representaron los estados de fabricación, y los estados correspondientes a las prospecciones emprendidas por el fabricante, por el departamento de ingeniería tanto con densímetros nucleares (i.e. DN) calibrados, como con cono y arena (i.e. CyA). Los estados de fabricación demuestran que el CBR de fabricación de la base estuvo en el rango de 80 a 100%, y el CBR de la sub-base entre 70 y 85%. Los estados medidos con las prospecciones patológicas demuestran una disminución de la resistencia inicial hasta valores de CBR de 20 a 10% debida a la hidratación; en el material de base incluso se observó una disminución de la densidad seca, esto muy probablemente debido a la distorsión producida por las fallas.

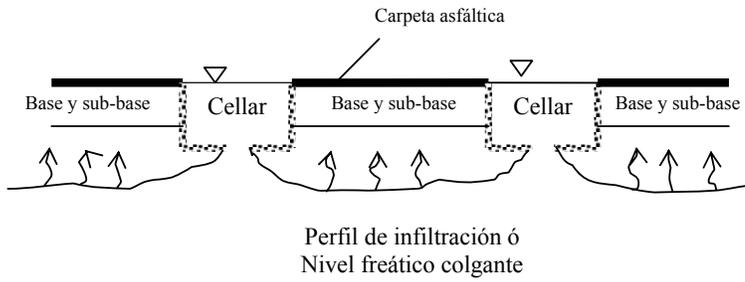


Figura 2.8. Modelo de hidratación de los materiales en el área de operaciones

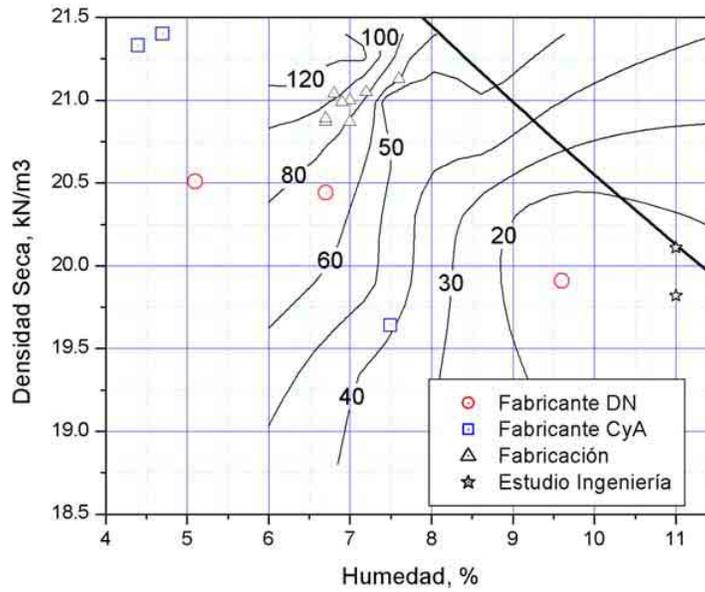


Figura 2.9. Material de base ($F_p=0.25$)

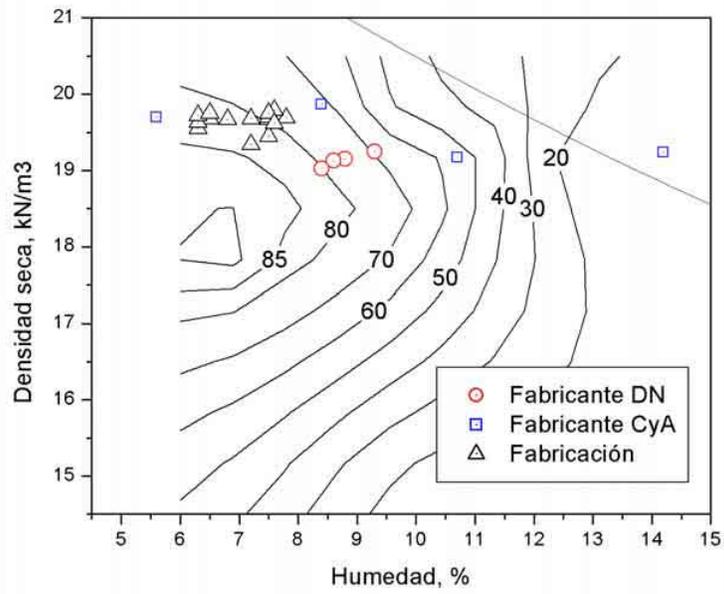


Figura 2.10 Mapa subbase ($F_p=0.55$)

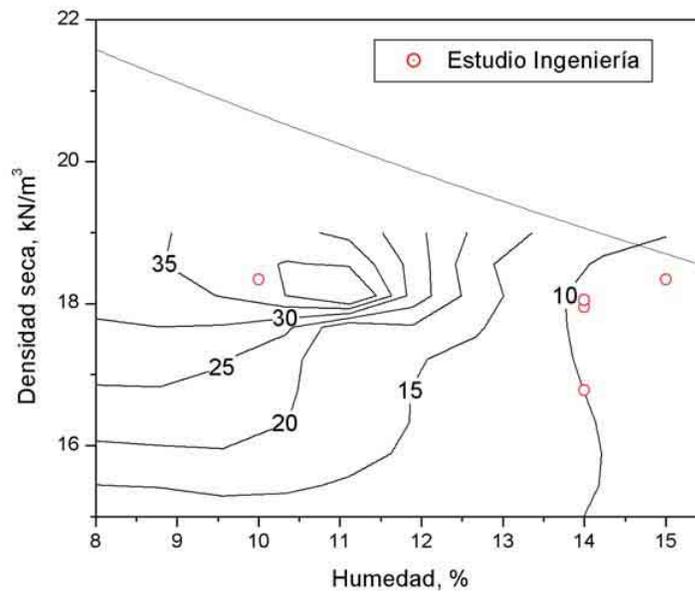


Figura 2.11. Mapa para $F_p=0.38$

2.5 RAMCODES en mezclas asfálticas

Ciertamente, en la evolución reciente de las mezclas asfálticas (i.e. SHRP, y consecuentemente Superpave®), los tópicos de diseño relacionados con el ligante, los agregados, y las propiedades de la mezcla han recibido la máxima atención. Sin embargo, el control de la compactación en campo ha permanecido igual, sin cambios; el criterio de control es garantizar un mínimo nivel de densidad comparada con una referencia de laboratorio.

En primer lugar, en el diseño de la mezcla asfáltica, el análisis de vacíos, esto es, vacíos de aire (Vv), vacíos en el agregado mineral (VMA), y los vacíos llenados con asfalto (VFA), ha sido relacionado con el comportamiento de la mezcla compactada. Por ejemplo, una mezcla compactada con alto Vv podría acelerar la oxidación y el envejecimiento del ligante; una mezcla compactada con VMA por abajo o por encima de los límites de especificación hace al material más propenso a las deformaciones por ahuellamientos o roderas; una mezcla compactada con alto VFA podría producir exudación del ligante, y si quedara con bajo VFA no se garantizaría un adecuado recubrimiento de los agregados.

A parte de los requisitos de vacíos, la mezcla asfáltica es también exigida a cumplir requisiciones de propiedades mecánicas tales como la estabilidad y el flujo (i.e. diseño Marshall) en especímenes elaborados con métodos de compactación dinámica, o tales como estabilidad retenida (i.e. SHRP, Superpave) en especímenes preparados bajo energía de compactación por amasado giratorio, la cual se ha referido como la más representativa de las condiciones reales de colocación de campo. El procedimiento de diseño de mezclas resulta en el establecimiento de un contenido de asfalto óptimo (CA_{op}), también llamado "fórmula de trabajo", con la que se proporciona en planta, y sirve como parámetro de referencia de control. Los rangos típicos de variación aceptables para CA_{op} han sido establecidos en $\pm 0.30\%$ y $\pm 0.45\%$.

Los siguientes son los dos criterios más comunes para el control de calidad de compactación. Criterio A: el nivel de densidad mínimo permitido es 97% de la densidad de laboratorio. Criterio B: el nivel mínimo de densidad permitido es del 92% de la densidad máxima teórica (i.e. RICE). Se ha establecido que estos dos criterios son equivalentes en garantizar un contenido máximo de vacíos de aire de 8% en la mezcla compactada.

Sánchez-Leal, F.J. (2002c), sin embargo, ha afirmado que los criterios de diseño y de control de campo explicados arriba están divorciados entre sí, y que esta incoherencia podría conducir a aceptar estados en la mezcla compactada en campo que no cumplen con el diseño de mezclas, lo cual podría disminuir la vida útil de la mezcla compactada, o lo que es más, podría provocar su falla.

RAMCODES no sólo demuestra esta incoherencia y permite cuantificar el significado de la misma en términos de análisis de vacíos y propiedades mecánicas, sino que también previene contra esta situación y sus consecuencias. En la experiencia práctica, RAMCODES ha demostrado ser una poderosa herramienta para el diseño, control y análisis de mezclas asfálticas compactadas dado que permite entrelazar la teoría y la práctica de una manera sencilla y eficiente.

Un experimento factorial

Un experimento factorial es una técnica estadística de análisis que permite estudiar la influencia de varios factores o variables en la respuesta medida en un experimento. Los experimentos factoriales se usan con gran efectividad en la optimización del diseño de producciones industriales combinando métodos gráficos con el estudio de superficies de respuesta en la interpretación de resultados.

RAMCODES está basado en un experimento factorial de dos niveles o factores, a saber: el contenido de asfalto (CA) y el peso específico bulk (G_{mb}). Como geomaterial, el comportamiento de resistencia y deformabilidad de una mezcla asfáltica puede ser estudiado bajo la concepción de Coulomb de cohesión y fricción. G_{mb} es una medida directa de la fricción o trabazón entre partículas; y CA es una medida de la cohesión. Esta concepción permite una ventaja práctica dado que CA y G_{mb} son variables comúnmente utilizadas en el control de compactación de campo.

El diseño de mezclas asfálticas requiere experimentación. Las metodologías de Marshall, Hveem, o más recientemente Superpave, contemplan experimentos basados en una concepción física del comportamiento de la mezcla compactada. Desafortunadamente, ninguna de estas metodologías contempla un experimento factorial para el diseño de experimentos y el análisis de resultados. RAMCODES presenta un experimento factorial para la metodología Marshall, que podría ser extendido a otras metodologías como Superpave. Las respuestas medidas de estabilidad y flujo, son definidas respectivamente como la máxima resistencia de un espécimen bajo carga monotónica, y su deformación vertical asociada. Para cubrir en rango de trabajo de la mezcla en campo, en el RAMCODES, los ensayos Marshall se realizan en especímenes elaborados con varias energías de compactación que van de 35, 50, 75 y 100 golpes/cara, en un amplio rango de CA.

La representación gráfica de los valores de respuesta en el marco CA- G_{mb} genera una gráfica de contorno que viene a ser una imagen de la superficie de respuesta para el parámetro mecánico seleccionado (v.g. estabilidad, flujo). Los vacíos son una función del CA y del G_{mb} , y las especificaciones de vacíos se representan en los mapas como iso-líneas. La intersección de estas líneas produce una construcción gráfica llamada "polígono de vacíos" definida como la máxima región

en el espacio CA- G_{mb} donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos. Tal como se explicará más adelante, el polígono de vacíos resulta una herramienta muy útil, no sólo en el diseño, sino también en el control de compactación, y en la rehabilitación. En los siguientes incisos se elaborarán mapas para propiedades mecánicas y se construirá el polígono de vacíos para una mezcla asfáltica real.

Construcción de los mapas

Los siguientes mapas y el polígono de vacíos serán elaborados con información de una mezcla asfáltica cuya granulometría verifica la Superpave 19.00-mm, producida en la planta Yamaro, localizada en San José de Quibor, Estado Lara, Venezuela, durante la construcción de la vía “El Rosario-El Parchal”. La Tabla 2.7 resume los datos para CA, G_{mb} , estabilidad, y flujo, obtenidos en especímenes compactados bajo energías de 35, 50, 75 y 100 golpes/cara. Se incluyen también los datos correspondientes a la densidad máxima teórica del ensayo RICE (i.e. G_{mm}). La representación gráfica de las parejas (CA, G_{mm}) se ajusta a un línea recta cuyos parámetros resultaron con intercepto $a=2.594$, y pendiente $b=-0.0342$. La Figura 2.12 presenta las curvas de compactación para todas las energías de compactación, y la función RICE, es decir, el ajuste lineal para los datos del RICE. Obsérvese en la figura que la información obtenida representa un rango de trabajo de 2.230 a 2.350, para G_{mb} , y de 4.0-6.0%, para CA. Bajo las limitaciones de la concepción Marshall, estos rangos pueden representar el comportamiento de campo.

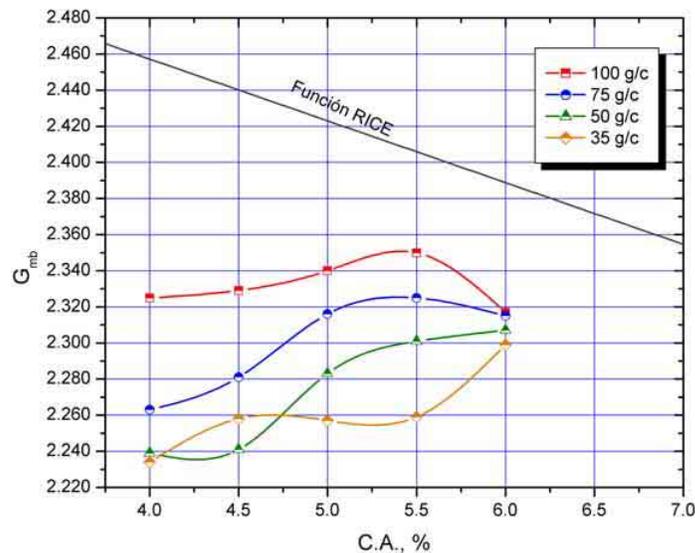


Figura 2.12. Curvas de compactación para elaboración de los mapas de resistencia

Las Figuras 2.13 y 2.14 muestran las gráficas de contorno o mapas para estabilidad y flujo, respectivamente, realizados a partir de la información en la Tabla 2.7. Los mapas permiten analizar la variación de las propiedades mecánicas en el rango de estudio. Por ejemplo, para la mezcla estudiada, la estabilidad se incrementa prácticamente sólo con el incremento de G_{mb} . Por el otro lado, el flujo parece incrementarse con el CA, sin afectarse por algún cambio de G_{mb} .

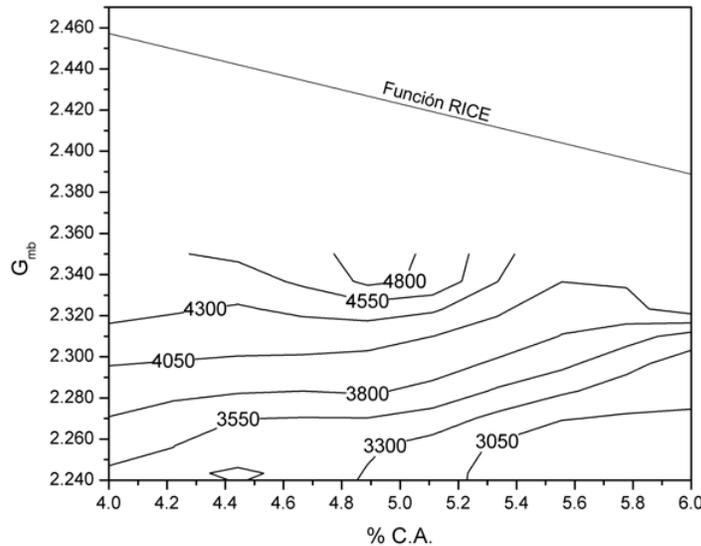


Figura 2.13. Gráfica de contorno o “mapa” para estabilidad Marshall, en lb

Tabla 2.7 Resumen de datos para CA, G_{mb} , estabilidad y flujo, para especímenes con diferentes energías

CA	G_{mb}				G_{mm}	Estabilidad (lb)				Flujo (0.01")			
	100	75	50	35		-	100	75	50	35	100	75	50
4.0	2.325	2.263	2.239	2.234	2.458	4,420	3,753	3,492	2,970	14	8.3	11	11
4.5	2.329	2.281	2.241	2.258	2.458	4,284	3,784	3,740	3,199	10	9.7	12	11
5.0	2.340	2.316	2.283	2.257	2.423	5,168	4,151	3,876	3,264	10	11.7	12	12
5.5	2.350	2.325	2.301	2.259	2.406	4,066	3,870	3,774	2,807	16	13	13	13
6.0	2.317	2.315	2.307	2.299	2.389	4,385	3,562	2,298	3,162	16.5	15.7	-	-

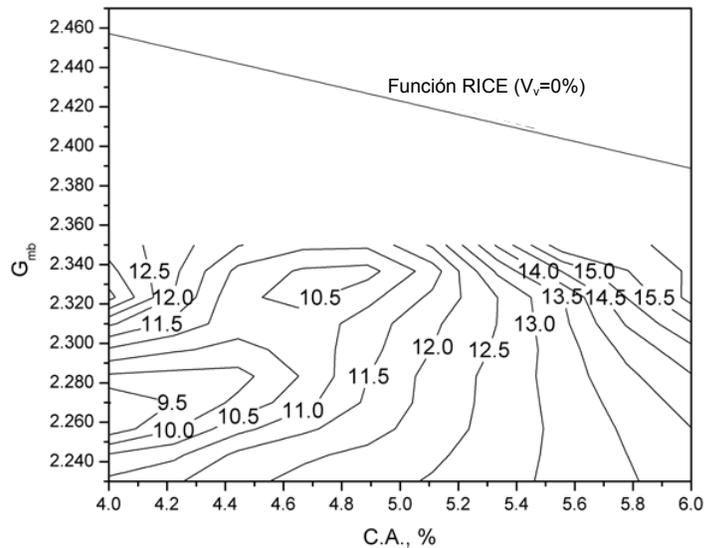


Figura 2.14. Gráfica de contorno o “mapa” para flujo Marshall, en lb

El polígono de vacíos

Los rangos que demarcan las especificaciones de vacíos para la mezcla estudiada son 3-5%, para vacíos de aire, 13-15%, para VMA (i.e. aplicaciones distintas a una intersección), y 65-75%, para VFA (i.e. nivel de tráfico alto). En las mezclas asfálticas, los vacíos se definen según las siguientes expresiones. G_{sb} es el peso específico bulk de la combinación de agregados seleccionada, y vale 2.571 para la mezclas estudiada.

$$G_{mb} = \left(1 - \frac{V_v}{100}\right) \cdot (a + b \cdot CA) \quad (2.1)$$

$$G_{mb} = \frac{100 - VMA}{100 - CA} \cdot G_{sb} \quad (2.2)$$

$$\frac{VFA}{100} = 1 - \frac{\left(1 - \frac{G_{mb}}{a + b \cdot CA}\right) \cdot 100}{100 - (100 - CA) \cdot \frac{G_{mb}}{G_{sb}}} \quad (2.3)$$

La Figura 2.15 muestra las líneas para vacíos de aire de 3 y 5%, obtenidas según la expresión (2.1), y la función RICE, o línea para vacíos de aire 0%. La Figura 2.16 muestra las líneas de VMA para 13 y 15%, obtenidas según la expresión (2.2), y también las líneas de iso valores de VFA para 65 y 75%, según la expresión (2.3). Asimismo, se muestran los vértices de intersección que construyen el área máxima donde se cumplen todas las especificaciones de vacíos, esto es, el polígono de vacíos, definido según la región asurada de la Figura 2.17.

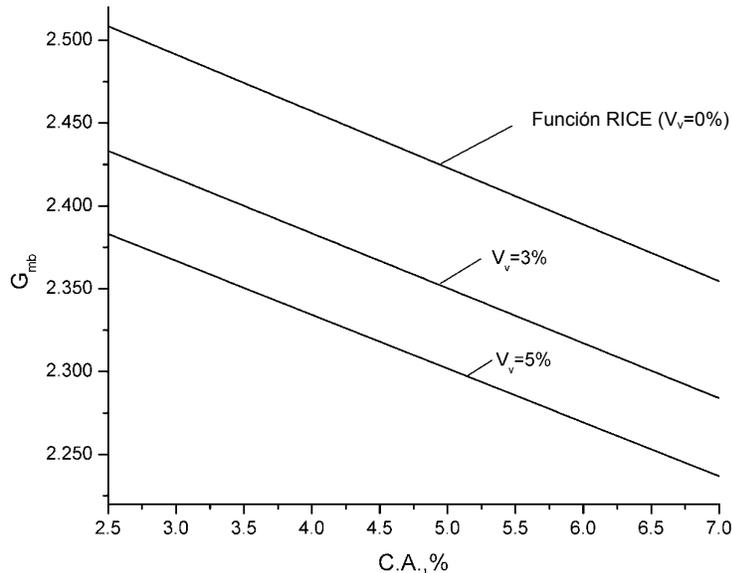


Figura 2.15. Iso-líneas de Vv

La superposición de los mapas de respuesta devuelve una visión de la variación de las propiedades mecánicas dentro del área donde se cumplen las especificaciones de vacíos. Las Figuras 2.18 y 2.19 presentan esta superposición para el caso de la mezcla estudiada. Obsérvese que dentro del polígono de vacíos, la estabilidad varía entre 3900 y 4800 lb, y el flujo varía entre 10.5 y 13.0 centésimos de pulgada. Estos valores cumplen con las especificaciones típicas para estas propiedades mecánicas. De esta manera, el polígono de vacíos se convierte en una región de control de calidad para la aceptación de lotes de mezcla compactada.

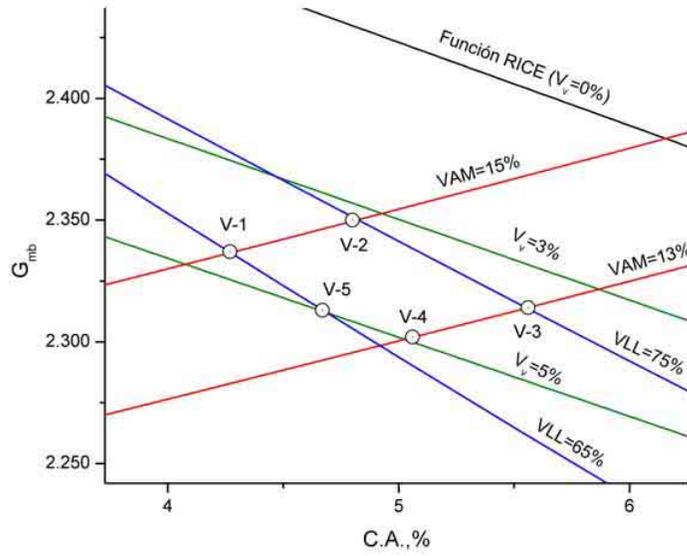


Figura 2.16. Iso-líneas de Vv, VMA, y VFA

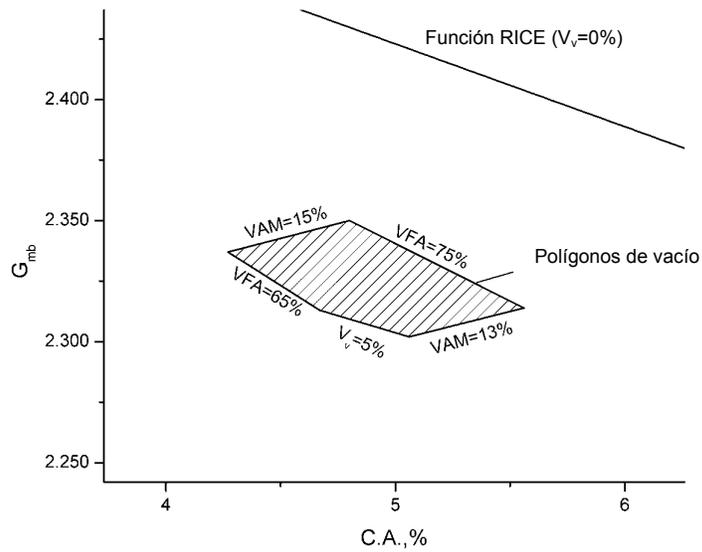


Figura 2.17 Definición del polígono de vacíos

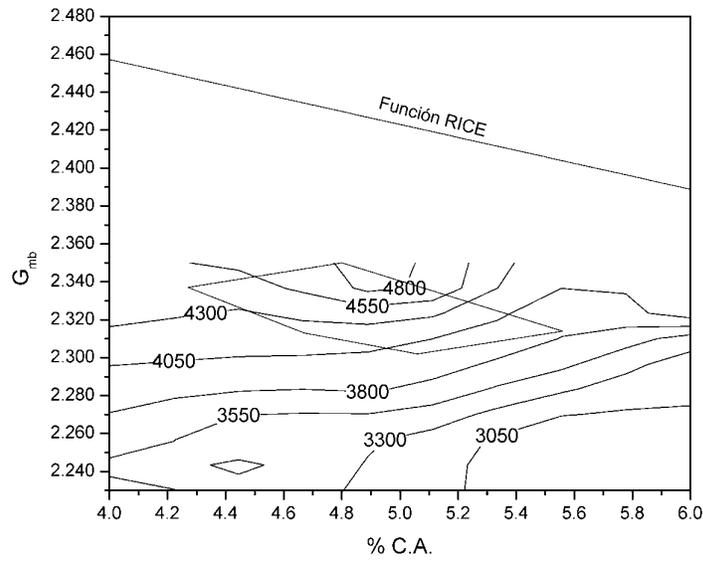


Figura 2.18 Superposición del polígono de vacíos en el mapa de estabilidad

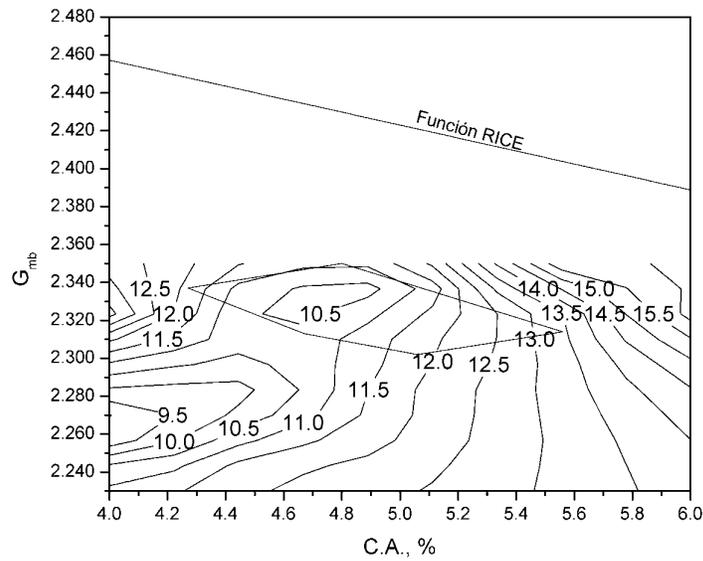


Figura 2.19 Superposición del polígono de vacíos en el mapa de flujo

Variación de la producción

En el estudio de la variación de la producción de una mezcla asfáltica, emergen las siguientes interrogantes a los diseñadores, inspectores y constructores. ¿Cómo afecta al comportamiento de la mezcla compactada la variación de la gradación? ¿Es la curva de compactación de diseño un absoluto, o esta podría tener una cierta variación? ¿Podría variar el RICE con respecto a los valores de diseño, durante la producción? ¿Hasta cuánto podría ser aceptable la variación del CA con respecto al valor óptimo obtenido en el diseño? En los siguientes párrafos, RAMCODES presentará una concepción para responder estas interrogantes. Toda la información que se analizará proviene de los controles diarios de producción de la mezcla Yamaro, y de los controles diarios de una mezcla asfáltica en caliente de 19.0-mm, elaborada por la planta EICA, para la carpeta de la autopista venezolana “José Antonio Páez” (Sánchez-Leal, F.J., 2002c).

La graduación es uno de los factores que más afecta el producto industrial llamado mezcla asfáltica, esta es la razón por la que el control de su variación es un aspecto de significativa importancia en el aseguramiento de la calidad de este producto. RAMCODES ofrece un recurso para evitar las engorrosas prácticas de control basadas en curvas granulométricas. El factor característico, F_p , describe cuantitativamente un geomaterial basado en su proporción granulométrica y en la superficie específica de sus finos. Dado que las mezclas asfálticas en general tienen un contenido de finos muy bajo (i.e. menos de 8% en peso), tal como el caso de las mezclas analizadas, se usó el siguiente factor característico modificado para evaluar la variación de la gradación de la producción diaria.

$$F_p = 1.1 \cdot \frac{F}{1+G} \quad (2.4)$$

F es la proporción de finos (i.e. pasa #200), G es la proporción de grava (i.e. retenido en #4). En general, mientras mayor es el F_p , más fino es el material.

Con esta expresión se calculó el valor de F_p para un conjunto de lotes de muestreo diario entre los meses de Mayo y Junio de 2002 (lotes 30 a 55), de la mezcla Yamaro. La Figura 2.20 muestra la variación de F_p para cada lote. Entre los lotes 30 a 40 se obtuvo un F_p promedio de 0.04, y en los lotes posteriores (41 a 55) se obtuvo un promedio de 0.06. La granulometría de diseño tuvo un $F_p=0.067$. Las gráficas que se muestran a continuación (Figuras 2.21 y 2.22) se obtuvieron representando los pares de G_{mb} y G_{mm} obtenidos en laboratorio sobre mezcla fresca compactando briquetas a 75 golpes/cara y realizando el ensayo RICE, respectivamente. Estas gráficas pretenden evaluar si esta variación es significativa.

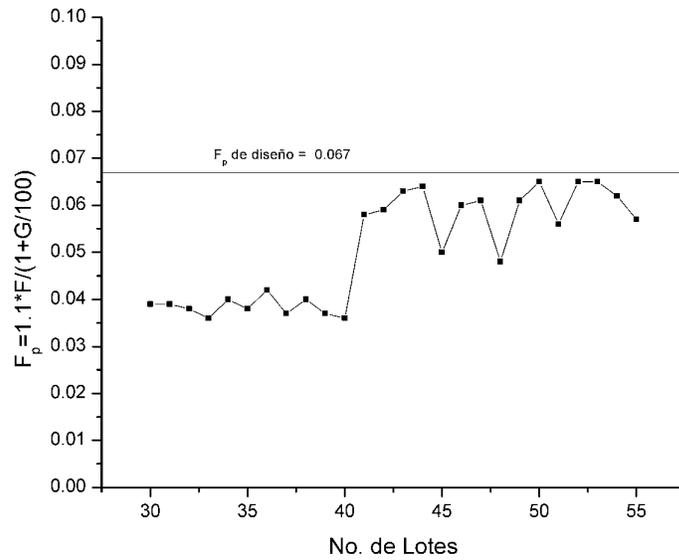


Figura 2.20 Evaluación de la variación de la producción por medio del F_p

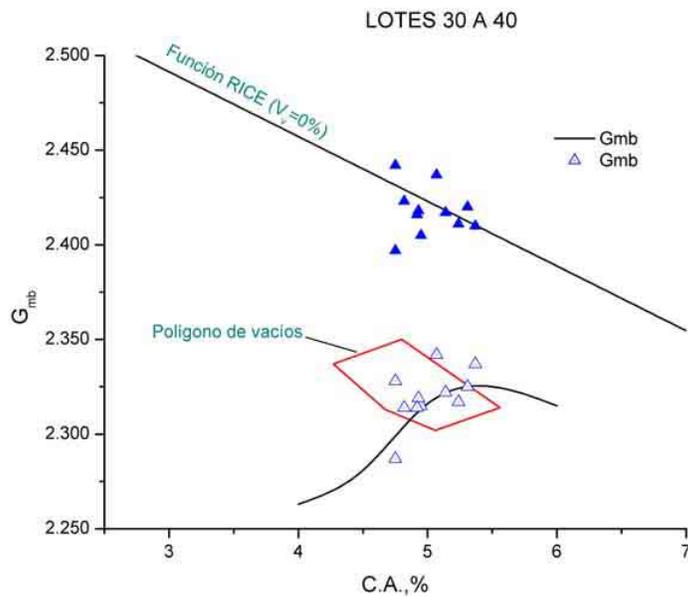


Figura 2.21 Evaluación de la variación de la producción, lotes 30 a 40

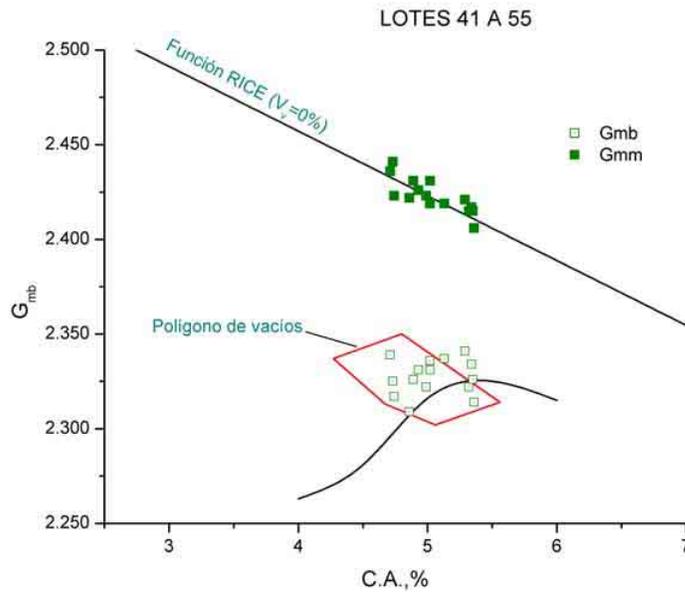


Figura 2.22 Evaluación de la variación de la producción, lotes 41 a 55

Tras la observación de las gráficas se demuestra que la variación de la granulometría no es significativa pues los estados (i.e. combinación CA, G_{mb}) de ambos grupos de lotes se ajustaron tanto a la función RICE, como a la curva de compactación para 75 golpes/cara. La función RICE y la curva de compactación vienen a ser una función de probabilidad para estados obtenidos en los controles diarios, de esta manera, ni la curva de compactación, ni la función RICE son absolutos. Para ilustrar aún más esta aseveración, en la Figura 2.23 se muestra una gráfica de variación de estados de controles diarios para un universo de 209 muestras de la mezcla EICA.

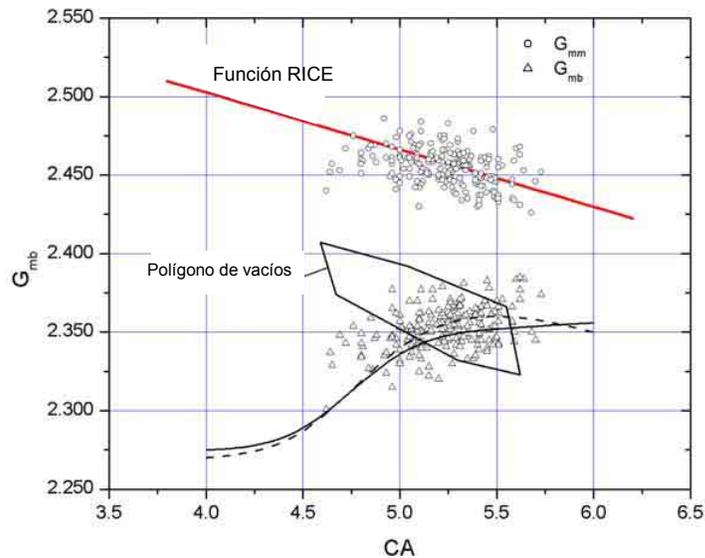


Figura 2.23 Evaluación de la variación de la producción. Mezcla EICA

Divorcio entre criterios de diseño y control

La Figura 2.24 contrasta los criterios de diseño y control explicados con anterioridad para el caso de la mezcla Yamaro. Se identifica en primer plano el polígono de vacíos. El rombo grande lo definen por la vertical los criterios de densidad mínima (i.e. 97% de la densidad de laboratorio, o el 92% del RICE), y la función RICE, y por la horizontal, el rango tolerable para CA, en este caso $\pm 0.45\%$ de $CA_{op}=5.00\%$. Y luego, se identifica el polígono de vacíos, definiendo la región máxima donde se cumplen todas las especificaciones de diseño para la mezcla. Lo primero que resalta de este contraste es que la región de control de campo permite, con amplio margen, estados que violan las especificaciones de diseño. Se evidencia el divorcio completo de los criterios tradicionales de diseño y control de campo. En la misma figura se muestra una iso-línea para VFA=55% que pasa por la región de control tradicional; una mezcla así compactada, aunque cumpla los requisitos de control de compactación tradicionales, estaría expuesta a una rápida falla por denudación (i.e. raveling).

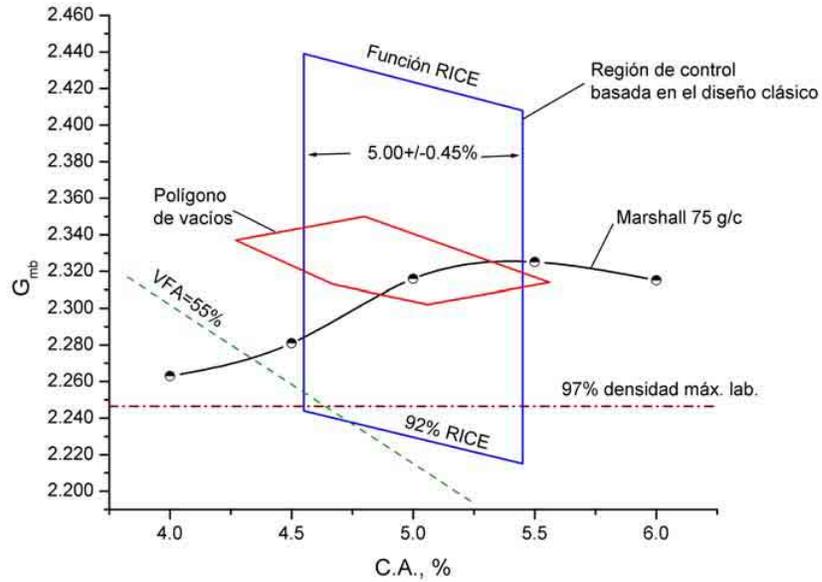


Figura 2.24 Contraste entre el polígono de vacíos y los criterios tradicionales de control

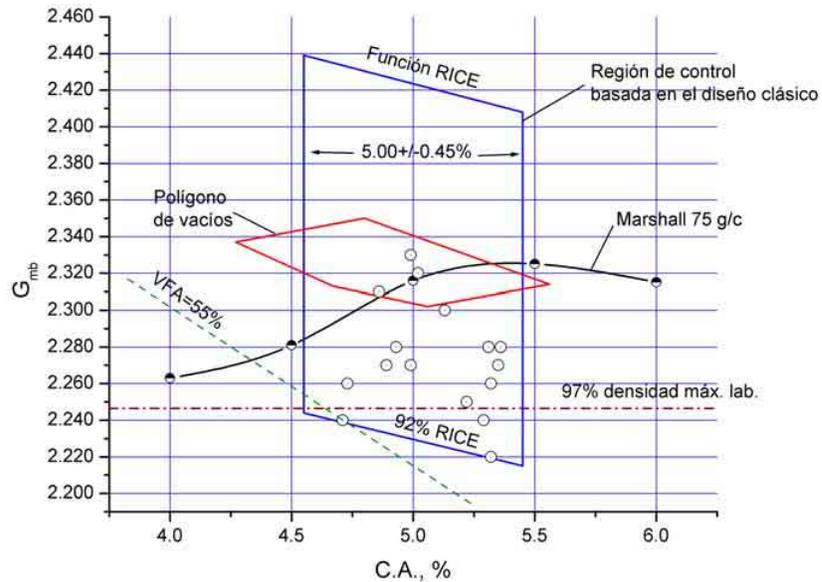


Figura 2.25. Representación de estados en un lote controlado

En un tramo de la carretera “El Rosario-El Parchal” se extrajeron un total de 16 núcleos (i.e. core-drills) de la carpeta compactada, a los que se les determinó el G_{mb} , y el CA. Estas parejas de datos, o estados, se representaron en la Figura 2.25 junto con los criterios tradicionales de control de campo y el polígono de vacíos. El total de los estados (i.e. 16/16) quedaron dentro del rombo de criterios tradicionales de control, por lo que de seguro el lote inspeccionado fue aceptado. No obstante, sólo un 25% (i.e. 4/16) de estos estados quedaron dentro del polígono de vacíos, por lo que, de ser correctas las especificaciones de diseño, se espera que la mezcla, en el lote inspeccionado, no tenga un comportamiento satisfactorio. Se observa también, en la gráfica, que es posible, bajo la energía de compactación de campo, conseguir que los estados entren en el polígono de vacíos.

3. Conclusiones

Los criterios tradicionales para el establecimiento de las especificaciones de construcción de rellenos están fundamentadas en la premisa: “a mayor densidad, mayor resistencia”. Esta premisa se muestra claramente en la interpretación clásica del ensayo de CBR, el más frecuentemente recurrido ensayo en las obras de vialidad, con probetas sometidas a un periodo de inmersión. No obstante, se ha demostrado tanto en el pasado como en trabajos recientes, que la relación entre la resistencia, la densidad y la humedad es compleja y requiere un estudio más detallado. La ausencia de este estudio bien podría ocasionar fallas en los rellenos afectando estructuras civiles tales como carreteras, plataformas de tierra, etc. La metodología RAMCODES, presentada aquí como un nuevo enfoque para el diseño y control de compactación, permite realizar de una manera práctica y a la vez consistente un estudio detallado de la mencionada relación. La metodología permite incorporar criterios de la Mecánica de Suelos No Saturados que explican el comportamiento del suelo compactado, con base en parámetros tradicionales que pueden ser medidos sin dificultad tanto en el laboratorio como en el campo, como lo son la densidad seca y el contenido de agua del suelo. RAMCODES, en sus fases de aplicación a suelos compactados, está dividido en tres partes, a saber: la clasificación cuantitativa, el potencial de densificación y los mapas de resistencia que explican la relación contenido de agua-densidad-resistencia. La clasificación cuantitativa permite resumir en un solo valor los parámetros que, según el autor, más influyen el comportamiento del suelo, como lo son la proporción granulométrica y la superficie específica de los finos. El potencial de densificación es definido aquí por los tradicionales parámetros de máxima densificación, DMS, y su humedad asociada, CAO. Con el auxilio del factor característico, F_p , se pudo encontrar una relación estrecha entre estos parámetros y la clasificación del material, así como la demostración de que el potencial de densificación, así como sus niveles de variabilidad, son iguales tanto en campo como en laboratorio. Los mapas de resistencia son el producto de un experimento diseñado con un fundamento estadístico (i.e. experimento factorial) para evaluar la respuesta, en este caso de resistencia, del suelo ante la variación de la humedad y la densidad. El resultado de un experimento así diseñado es una superficie de respuesta cuya representación en el plano es un gráfico de contorno que permite representar cualquier estado físicamente posible del suelo. La afirmación de que para una misma región geológica suelos con el mismo valor de F_p tendrán el mismo mapa de resistencias, es soportada por experiencias como la presentada en la Figura 12, y esto es de gran asistencia en la selección de préstamos. Los mapas de resistencia derivan en regiones de aceptación para asegurar que en campo el material tenga la resistencia de diseño. Se llaman mapas porque guían al diseñador para relacionar eficientemente los parámetros que mide en el campo con las expectativas contempladas en el diseño. Estos mapas también asisten al ingeniero que realiza la patología de una falla para evaluar la resistencia de campo a partir de los valores densidad y humedad que se tomen durante la prospección. En la investigación, los mapas pueden explicar y cuantificar el efecto de la

microestructura el suelo compactado. Las diferencias entre la resistencia de especímenes hidratados y no hidratados con el mismo estado final estriban en que ambos pertenecen a superficies de respuesta distinta. Se demostró que los mapas de resistencia trazados con especímenes en condición tal como se compactó permiten evaluar de manera conservadora la resistencia del suelo a través de sus trayectorias de hidratación. Entre las aplicaciones, RAMCODES demostró también ser una herramienta para la interpretación de la respuesta del suelo compactado ante cargas cíclicas, discriminando entre tipos de material con el auxilio de la clasificación cuantitativa.

A pesar de que las especificaciones para vacíos (i.e. totales, llenados con asfalto, de agregado mineral) y para parámetros mecánicos están fundamentadas en exhaustivas investigaciones sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas compactadas, la metodología tradicional de control de compactación de mezclas asfálticas, basada en la obtención de un determinado nivel de densificación y de verificar que la mezcla tenga un contenido óptimo de asfalto, no permite controlar todos los parámetros de especificación, con lo que se pueden cometer errores de aceptación de lotes defectuosos, o el rechazo de lotes buenos. La contravención de las especificaciones de vacíos puede acarrear problemas a la mezcla de ahuellamientos, envejecimiento prematuro, fragilidad, exudación. La trasgresión de las especificaciones de parámetros mecánicos puede conseguir deformaciones excesivas en el pavimento y falta de resistencia.

El enfoque propuesto en este trabajo promueve la incorporación de todas las especificaciones en los criterios de control de campo, mediante la representación de los estados en el espacio CA- G_{mb} . En primer lugar se incorporan las especificaciones de vacíos por medio de una construcción gráfica denominada “polígono de vacíos” que se elabora intersectando las líneas de iso-valores de vacíos que son trazadas según las ecuaciones de sus definiciones físicas. Luego se incorporan los contornos para estabilidad y flujo, para los valores de especificación, trazados a partir del mapeo de resultados de ensayos a compresión realizados en familias de especímenes elaborados con energía de compactación variable, en un amplio rango de contenidos de asfalto. La combinación de todos estos trazos genera un área de aceptación definida como la región más grande de posibles combinaciones de CA y G_{mb} donde se cumplen todas las especificaciones.

El nuevo enfoque tiene aplicaciones en el diseño pues representando la(s) curva(s) de compactación de laboratorio se verifica la factibilidad de alcanzar estados dentro de la región de aceptación definida para la muestra. Así mismo se pueden definir rangos de variación para el contenido de asfalto a agregar a la mezcla. En el control de compactación, por una parte, los lotes se aceptan sólo si las mediciones de G_{mb} y CA de campo están dentro de la región de aceptación. Y por otra, el marco propuesto, en combinación con el factor característico, permiten cuantificar la variabilidad de la producción y evaluar sus implicaciones en las propiedades de la mezcla. En la revisión de carpetas existentes, la información típica de los núcleos extraídos, tal como G_{mb} , CA, gradación, permite conocer el

valor de los parámetros mecánicos en sitio, cuando se cuenta con los contornos para dicho parámetro.

Las mezclas asfálticas pueden considerarse como suelos, pero con un cementante muy particular que es el ligante asfáltico. A temperatura constante, las fuerzas superficiales producidas por el ligante sobre y entre las partículas en el arreglo volumétrico de la mezcla, en conjunción con la acción de la compactación, gobiernan la densificación. También, la resistencia y las propiedades mecánicas relacionadas son controladas por la trabazón y las fuerzas producidas por el ligante. El enfoque propuesto, basado en el espacio CA-G_{mb}, constituye un eficiente marco referencial para estudiar la influencia de estas variables controladoras del comportamiento de la mezcla, constituyendo un puente entre la teoría y la práctica.

Las especificaciones tradicionales de diseño y control de compactación están fundamentadas en la premisa: “a mayor densidad, mayor resistencia”. Esta afirmación puede conllevar a errores de interpretación que derivan en fallas en las estructuras de tierra. La metodología RAMCODES, presentada en este trabajo como un nuevo enfoque para el diseño y control de compactación, permite estudiar la respuesta de resistencia de un suelo compactado de una manera detallada, incorporando de manera formal los parámetros y criterios de la Mecánica de Suelos No Saturados, a través de los tradicionales parámetros de densidad y humedad que pueden ser medidos sin dificultad tanto en campo como en laboratorio. Este nuevo enfoque tiene múltiples aplicaciones no sólo para el diseño y control de compactación de los rellenos, sino también para el estudio selección y explotación de préstamos, así como servir de marco de referencia para el estudio formal de la respuesta de resistencia de un suelo compactado.

La práctica tradicional de control de compactación de campo, basada en la consecución de un nivel específico de densificación, está divorciada de los criterios que fundamentan y constituyen el diseño. En consecuencia, no se tiene control sobre la aceptación de un lote defectuoso o el rechazo de un lote bueno, ni se tiene sensibilidad sobre la magnitud de la discordancia entre las propiedades de la mezcla en sitio con respecto a las previstas en el diseño.

El enfoque presentado, basado en un marco referencial que incorpora en un solo gráfico las especificaciones para vacíos y para los parámetros mecánicos, deriva en la generación de una región de aceptación que asegura el enlace del control de campo con los criterios del diseño. Sin menoscabar en la teoría, el enfoque le da al ingeniero de campo, al diseñador, al inspector, una herramienta valiosa y práctica no sólo para el diseño, sino también para el control y para la revisión de una mezcla asfáltica. Adicionalmente el enfoque representa un marco de referencia eficiente para la interpretación de resultados de investigaciones científicas concernientes al comportamiento de una mezcla asfáltica.

Referencias

- Al-Khafaji, A.N. (1993). Estimation of soil compaction parameters by means of Atterberg limits. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 26, 359-368. The Geological Society.
- Corredor M., G y Solís V., R. (2001). *Mezclas asfálticas en caliente: Materiales y diseño, producción y control en planta, extendido y compactación*. Material de apoyo para curso INVEAS-PDVSA. Maturín, Venezuela, Septiembre 17-22.
- Corredor M., G. (1996). *Cambios en los criterios Marshall para las mezclas asfálticas en caliente*. INVEAS Informa. Boletín Técnico. Año 1 Publicación No. 3. Octubre.
- D 1883-94. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils. *Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.08*.
- Garnica Anguas P. et al (2000). Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares. Instituto Mexicano del transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 142. Querétaro, México.
- Garnica Anguas P. et al (2001). Influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos. Instituto Mexicano del transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación Técnica No. 165. Querétaro, México.
- Garnica Anguas, P, y Pérez García, N., (2002). Influencia de la plasticidad en el módulo de resiliencia y deformaciones permanentes en suelos finos compactados. Instituto Mexicano del Transporte.
- Hausmann, M.R. (1990). *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill, Inc.
- Marinho F.A.M. & Stuermer M.M. (2000). The Influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. *Advances in Unsaturated Geotechnics*. ASCE. *Geotechnical Special Publication*. Denver.
- Marinho F.A.M. (2002). Comunicación personal.
- Mendoza M.J. (1992). Enfoques recientes en la compactación de suelos. *Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Publicación Técnica No. 33. Querétaro. México*.
- MOP:E301. *Método de ensayo para determinar las propiedades Marshall*.
- Saha S. & Chattopadhyay B.C. (1988). Prediction of compaction characteristics of soils from index properties. *Indian Geotechnical Journal*, 18 (4).

Sánchez-Leal, F.J. (1998). Método alternativo para el control de compactación de suelos en el proyecto SINCOR. *Informe interno SOLESTUDIOS C.A. Coro, Venezuela, Noviembre.*

Sánchez-Leal, F.J. (2000a). Predicción de los parámetros de densificación del material de suelo. *2do. Congreso Venezolano del INVEAS. Maracaibo, Venezuela, Octubre.*

Sánchez-Leal, F.J. (2000b). Predicción de los parámetros de resistencia del material de suelo. *2do. Congreso Venezolano del INVEAS. Maracaibo, Venezuela, Octubre.*

Sánchez-Leal F.J., (2002a). Correlation of maximum density and optimum water content with index properties. *3rd. International Conference on Unsaturated Soils. Recife, Brazil. March. Volume 2. pp. 647-652.*

Sánchez-Leal F.J., (2002b). Interpretation of CBR-test results under the shear-strength concept of unsaturated soil mechanics. *3rd. International Conference on Unsaturated Soils. Recife, Brazil. March. Volume 2. pp. 663-668.*

Sánchez-Leal, F.J. (2002c). Nuevo enfoque en el diseño y control de mezclas asfálticas. *3ra Conferencia Internacional de Asfalto. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia, Agosto.*

Sánchez-Leal, F.J (2002). Nuevo enfoque en el control de compactación de suelos. *XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Querétaro, México, Noviembre.*

Seed, H.B. & Chan C.K., (1959). Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, Vol. 85 No. SM5 (October).*

Turnbull, W.J. & Foster, C.R. (1956). Stabilization of materials by compaction. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. SM 2. April. 934-1, 934-23.*

Sánchez-Leal, F.J. (2002a), *Correlation of maximum density and optimum water content with index properties.* Proceedings of the 3rd. International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, 10-13, March, Recife, Brazil. pp. 647-652.

Sánchez-Leal, F.J. (2002b), *Interpretation of CBR-test results under the shear-strength concept of unsaturated soil mechanics.* Proceedings of the 3rd. International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, 10-13, March, Recife, Brazil. pp. 663-668.

The asphalt Institute (2002). *Official web site.* www.asphaltinstitute.org.

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel. (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel. (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx