

# PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE ABACOS ADIMENSIONALES DE RESPUESTA EN SUELOS REMOLDEADOS CON FINOS PLÁSTICOS, UTILIZANDO HERRAMIENTAS RAMCODES®

Luis Eloy Feo Carchidio

Ingeniería Geotécnica Prego, C.A.

Caracas, Distrito Capital

Email: [lfeo@ingprego.com](mailto:lfeo@ingprego.com)

**RESUMEN.** El siguiente trabajo es una aplicación de herramientas RAMCODES®, acrónimo en inglés de Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados, desarrollado por el Ing. F.J. Sánchez Leal. Es una propuesta teórica para un futuro trabajo de investigación orientado a obtener ábacos adimensionales de respuesta en suelos remoldeados con finos plásticos. La aplicación inmediata sería la aproximación al modelo constitutivo de un relleno con presencia de finos plásticos, permitiendo determinarle parámetros geomecánicos ( $\phi$ , C, E) para toda una gama de relaciones humedad-densidad, con una limitada cantidad de ensayos. Contar con un modelo constitutivo de un suelo remoldeado determinado aumentará el espectro de análisis al permitir seleccionar una región de aceptación, diferente al convencional % de compactación y humedad óptima, donde no necesariamente se encuentran las propiedades establecidas en el diseño para ese relleno; igualmente podrían evaluarse como varían sus propiedades si no es posible conservar en el tiempo la humedad de diseño. Esta propuesta teórica también serviría para la obtención de mapas humedad-densidad-CBR según la variante 7.2 de la norma ASTM D1883, siendo esto una interpretación similar a la ya hecha en RAMCODES®, con la ventaja de aportar una herramienta que permita construir el referido mapa con el ensayo de una sola probeta. La alternativa para establecer propiedades de un suelo de relleno luego de su construcción es la ejecución posterior de ensayos in situ, o ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas; en ambos casos subordinados a una sola relación densidad-humedad.

## INTRODUCCION

RAMCODES®<sup>1</sup> nace, entre otras cosas, cuando un ingeniero con formación geotécnica como Freddy Sánchez Leal se tropieza con la disciplina del asfalto y encuentra similitudes entre el tratamiento dado al diseño y control de mezclas asfálticas y el correspondiente a suelos compactados. De este afortunado accidente surge la definición de geomaterial que no es otra cosa que cualquier material de construcción con al menos tres fases: sólidos (aportados por los materiales térreos y materia prima de cualquier geomaterial), aire (cantidad de vacíos) y líquido (agua, líquido asfáltico, pasta agua/cemento u otro). El lector podrá advertir que prácticamente todos los materiales de construcción están contenidos en esta definición: suelos de relleno, concretos asfálticos, concretos convencionales, suelos cemento, concretos compactados con rodillo (RCC), etc.

RAMCODES® es un método de diseño apoyado en un conjunto de herramientas de cálculo que estaban dispersas entre diversas disciplinas de la ingeniería. Algunas de estas herramientas se corresponden con enfoques y métodos numéricos que dejaron de utilizarse en el tiempo por la ausencia de equipos adecuados de procesamiento; fueron sacadas del baúl y complementadas con otras, hábilmente desarrolladas y

adaptadas, para facilitarnos el estudio y predicción del comportamiento de los geomateriales.

También pudiéramos agregar al mérito del trabajo desarrollado por el Ing. Freddy Sánchez L., que ha sido capaz de popularizar (aún lo intenta tenazmente) herramientas que habían estado reservadas para la investigación científica y adaptarlas para la práctica diaria de la ingeniería.

Dentro del alcance de este trabajo se utilizará el método de diseño propuesto en RAMCODES® y se empleará su original sistema de clasificación, dejando para el lector interesado el estudio de otras herramientas disponibles: Polígono de vacíos®, Carta de gradación y aplicaciones específicas como Marshall acelerado por Ramcodes (RAM) y Superpave acelerado por Ramcodes (RAS).

El método de diseño está basado en experimentos factoriales, donde se seleccionan dos variables controlables (X,Y) y se evalúa la respuesta del material (Z), destacándose que las variables controlables (X,Y) generalmente interactúan para producir la respuesta (Z). Para el caso particular de estudio de suelos compactados las variables controlables pudieran ser el contenido de agua o humedad (X) y la densidad\_seca (Y), en tanto que la respuesta del material (Z) bien pudiera ser: CBR, resistencia al corte en cualquier modalidad, módulo de elasticidad, etc. Nótese que la variable densidad seca en realidad es una variable dependiente de otra variable sobre la que si tenemos control, tal como el nivel de energía de compactación.

<sup>1</sup> Ramcodes es marca registrada y el lector interesado podrá ahondar sobre sus fundamentos visitando [www.ramcodes.com](http://www.ramcodes.com)

De la construcción gráfica de un experimento factorial resulta un Mapa de Resistencia, o en términos más generales, un Mapa de Respuesta. Este concepto, Mapa de Resistencia, será de gran importancia para los ingenieros venezolanos por cuanto se está evaluando incluirlo en la revisión de la norma COVENIN 2000-87, en los puntos relacionados al grado de compactación en materiales utilizados como sub-base y bases de carreteras, Capítulo 11.

La otra herramienta RAMCODES® a utilizar es su sistema de clasificación cuantitativa, con la cual se le asignan a los materiales un valor en una escala continua que permita correlaciones con la respuesta del material. De esta manera se introduce el denominado Factor Característico, distinguido para suelos con finos plásticos y para suelos con finos no plásticos.

Dentro del contexto de esta propuesta teórica, y sobre la base de consideraciones aportadas más adelante, nos limitaremos a los suelos con finos plásticos, donde este factor denominado Fp se define como una combinación lineal de la plasticidad, medida indirecta de la superficie específica de los finos, y la proporción entre finos y gruesos. El factor Fp permite resumir en un solo valor numérico las dos características inherentes al geomaterial que, a juicio del autor de RAMCODES®, influyen principalmente el comportamiento mecánico de suelos, *para una misma región u origen geológico*. La siguiente expresión define al factor característico:

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

Donde:

WL = es el límite líquido

F = es el contenido de finos o pasante del tamiz No. 200

G = es el contenido de grava o proporción retenida en el tamiz No. 4, todos en decimal.

Fp = factor característico para materiales con finos plásticos.

Para complementar el logro de los objetivos de este trabajo, se propone el uso de ábacos adimensionales similares a los utilizados en otras disciplinas de la ingeniería, como por ejemplo el análisis y diseño de columnas sometidas a flexocompresión esviada. Estos ábacos se obtendrían de los diferentes Mapas de Respuesta correspondientes a una batería de ensayos sobre diversos suelos característicos (*muestras paramétricas*), obteniéndose factores adimensionales para cada combinación **humedad-relación de vacíos**.

La selección de los ensayos a realizar se discutirá más adelante pero pudieran ser tan variados como triaxiales, corte directo, CBR, etc.

La denominación de ábacos adimensionales es sólo para recordar su uso en otras disciplinas, pero en realidad -para el estado de difusión de las herramientas de cálculo- el objetivo será obtener un programa de cálculo que permita ajustar entre valores paramétricos los valores reales obtenidos de ensayos sobre *muestras objeto* (Límite Líquido, datos de granulometría, gravedad específica, densidad-humedad, ensayos de resistencia al corte, CBR, Módulo de Elasticidad, etc.) y obtener como respuesta un mapa en el espacio **densidad-seca-humedad**: ángulo de fricción ( $\phi$ ), cohesión (c), CBR, módulo de elasticidad (E), según sea el caso.

Trabajos similares, con objetivos diferentes, se han realizado con las denominadas “Superficies de Estado”. Estas son una representación gráfica de las relaciones entre cada una de las variables de estado (saturación y relación de vacíos) y el estado tensional de un suelo parcialmente saturado, sometidos a ensayos edométricos o de compresión isotrópica, representados por  $(\sigma - p_a)$  y  $(p_a - p_w)$ , donde:  $(\sigma - p_a)$  = esfuerzo neto, esfuerzo total menos presión de aire de poros y  $(p_a - p_w)$  = succión, presión de aire de poros menos presión de agua de poros (Matyas y Radhakrishna, 1968; citado por Alonso y Lloret, 1985. Ref. 01). Estas “Superficies de Estado” permiten describir los puntos característicos de la compresibilidad en suelos parcialmente saturados (fig. 01).

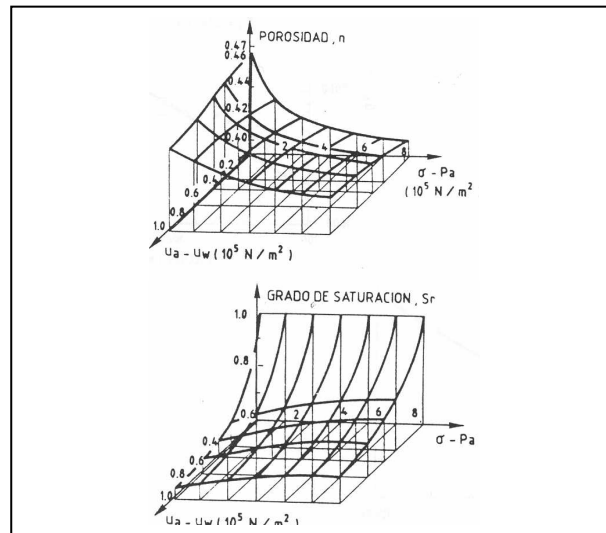


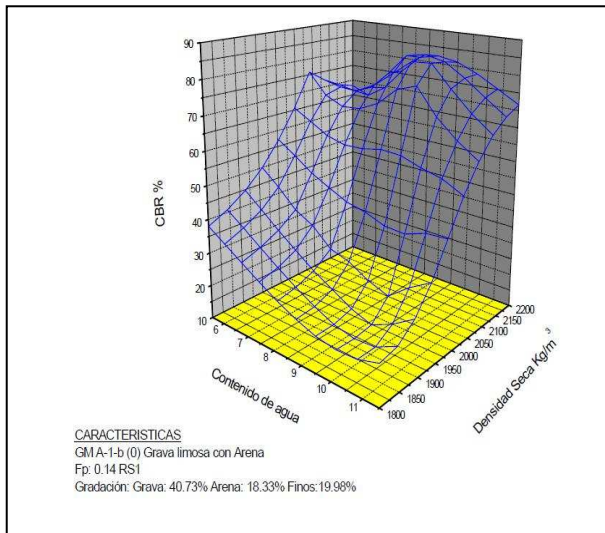
Fig. 01 Superficie de estado para  $e$  y  $S_r$  (Matyas y Radhakrishna, 1968)

## JUSTIFICACIÓN

¿Cuántas veces nos ha correspondido especificar parámetros de compactación para suelos de relleno y utilizamos el convencionalismo de recomendar 95% de un Proctor? ¿Ese suelo responderá como esperamos en el diseño? ¿Cuáles serán las propiedades geomecánicas que tendrá ese material luego de compactado? ¿Qué ocurre si las condiciones de humedad-densidad varían en el tiempo?

Está demostrado que no siempre se cumple la premisa que a mayor densidad mejores propiedades, bien sea resistencia al corte, Módulo de Elasticidad, CBR, etc. y en ese sentido volvemos a remitir al lector interesado a RAMCODES (ver figura 02) o a textos tan antiguos como Turnbull y Foster (1956).

Existen actualmente modelos elastoplásticos (Modelo elastoplástico Barcelona BBM 1990, Schiava y Etsé 1999) que predicen con bastante precisión el comportamiento de suelos parcialmente saturados. Estos son modelos aún reservados a la investigación científica que ameritan la ejecución de ensayos aún más inaccesibles a la práctica diaria, tal como el control y medición de la succión en ensayos de resistencia al corte. La revisión y discusión de estos modelos escapa al alcance de este trabajo.



**Fig. 02** Superficie de respuesta (Sánchez N. y Sánchez L, 2008)

El objeto pretendido acá es disponer de una herramienta que permita predecir razonablemente la respuesta de un relleno luego de construido, dado que la alternativa accesible para conocer las propiedades geomecánicas de ese material es realizar ensayos in situ o tomar muestras imperturbadas para ensayos de laboratorio. Peor aún, podemos utilizar correlaciones bibliográficas y estimar por un lado el ángulo de fricción ( $\phi$ ) y por otro la cohesión ( $C$ ), obviando la interacción de ambos parámetros con la humedad-densidad ¿Qué resultaría de un experimento factorial (a la misma humedad y energía de compactación) en donde las variables controlables sean: arcilla ( $X$ ), arena-grava ( $Y$ ) y las respuestas a medir sean  $\phi$  ( $Z_1$ ) y  $C$  ( $Z_2$ )? Cabe esperar que las respuestas ( $\phi$ ) y ( $C$ ) sean interdependientes, obviamente influenciadas por las relaciones humedad-densidad. Muy complejo para resolverlo con una simple correlación bibliográfica.

La motivación de este trabajo es la utilización óptima de los suelos, para obtener de éstos sus mejores propiedades según la aplicación prevista, dentro de un razonable margen de certidumbre. Lograr ese objetivo tiene implicaciones en el diseño y en el control de calidad de suelos de relleno, con consecuencias económicas y ambientales importantes.

Vale destacar que ya en RAMCODES® se han hecho esfuerzos predictivos para el caso del CBR, limitados a regiones geológicas específicas en la geografía venezolana. En esta ocasión pretendemos no sólo ampliarlo a la predicción de parámetros geomecánicos ( $\phi$ ,  $C$  e inclusive  $E$ ), independientemente de la geología, sino que creemos que pudiera simplificarse la obtención del Mapa de Resistencia densidad-humedad-CBR con la elaboración y ensayo de un solo espécimen en vez de los 15 usualmente necesarios de acuerdo a la variante 7.2 de la norma ASTM D -1883.

## SUELOS DE RELLENO

Dentro de todas las variables no controlables que afectan el complejo comportamiento geomecánico de los suelos en términos generales, podemos identificar para los suelos de relleno ciertas características que nos permitan simplificar, neutralizar o minimizar algunas de esas variables. Igualmente, y

con el mismo objeto de obviar la influencia de algunas variables, hemos delimitado nuestra propuesta a suelos con finos plásticos, que representan la gran mayoría de suelos encontrados en la geografía venezolana y que se utilizan como material de construcción.

La presencia de finos en valores tan bajos como 10% afecta la permeabilidad de un suelo, haciendo que su valor cambie en órdenes de magnitud. La presencia de ~5% a 10% en un suelo granular con relación de vacíos  $e \sim 0,6$ , colmata su espacio intersticial, pasando a segundo plano las variables que gobiernan la fricción entre las partículas granulares, tales como la angularidad o forma, tamaño máximo, mineralogía (dureza y fricción interpartícula). Este hecho, la presencia de finos, está reconocido en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (ASTM D 2487 y 2488), donde existe un rango entre 5% y 12% de contenidos de finos que modifica la clasificación de suelos (Ref. 015).

Adicionalmente a lo mencionado, en el aspecto de “angularidad”, difícilmente encontramos, al menos en los suelos venezolanos, partículas en los extremos de la escala, haciendo esta variable cada vez menos determinante para caracterizar la respuesta de suelos con finos plásticos utilizados para rellenos.

En cuanto a la dureza de los minerales, en los suelos de relleno esta variable queda reducida a la granulometría (por el efecto de la compactación) y esta ya está contenida en el factor  $F_p$ . No pasa lo mismo con la magnitud de la “fricción interpartículas” que sigue siendo una función de la dureza de los minerales (según el mecanismo de fricción planteado por Terzaghi en 1925), pero que se minimiza con la presencia de finos plásticos, como ya quedó visto.

Estas observaciones, obviando por los momentos el tema del origen geológico y de las propiedades mineralógicas de los finos, permiten adelantar que el factor  $F_p$  se aproxima bastante bien para caracterizar la respuesta de suelos de relleno con finos plásticos.

Por otro lado, los suelos de relleno ejecutados con control de calidad tienen una propiedad que adolecen los suelos en estado natural y es una mayor homogeneidad, sirviendo esta característica para esperar mejores predicciones de comportamiento que las que se pudieran pretender en suelos en estado natural, de los cuales es oportuno agregar la incertidumbre que existe en relación al estado natural y las variaciones ambientales producidas después de la formación del depósito.

Finalmente, el otro elemento que dificulta el comportamiento de los suelos, en términos generales, es la presencia del agua. Para el caso de los suelos de relleno se utilizan los conceptos de la mecánica de suelos no saturados (MSNS), siendo que éstos clasifican dentro de esta categoría con un rango de saturación entre 70% y 90%. Según se ha venido investigando desde 1960, los conceptos conocidos de la mecánica clásica de suelos (MCS) no aplican rigurosamente a la MSNS, en tanto que para estos últimos se acepta actualmente que existen dos variables independientes del estado de esfuerzos que son el “esfuerzo neto” (esfuerzo total menos presión de aire de poros) y la “succión” (presión de aire de poros menos presión de agua de poros), a diferencia de la MCS donde prevalece el concepto del “esfuerzo efectivo”. En este sentido, y

a los efectos de este trabajo con fines prácticos aproximativos, la presencia de agua y la condición de saturación parcial inherente a los suelos de relleno, queda implícitamente involucrada cuando se selecciona entre las variables controlables el espacio **densidad-humedad**, no obstante que no existe una relación unívoca entre saturación y succión, tal como se discutirá más adelante.

## MODELO PROPUESTO

La aplicabilidad de los resultados obtenidos en este trabajo quedará limitada a las características asumidas para los suelos remoldeados con finos plásticos. Premisas similares pudieran adoptarse para el caso de suelos con finos no plásticos, utilizándose en ese caso el Factor Característico denominado  $F_{np}$  en RAMCODES.

Como se adelantó, la construcción de los ábacos adimensionales se hará sobre la base de los Mapas de Respuesta, dividiendo los valores medidos por las cantidades dimensionales máximas, resultando factores adimensionales menores a uno (1). Así mismo, se utilizará el espacio **relación de vacíos-humedad**, en sustitución de la **densidad seca-humedad**, para normalizar los resultados en función a la gravedad específica de los sólidos. En el anexo se presenta un ejemplo de ábacos adimensionales para un suelo hipotético.

La hipótesis sobre la que se basa el modelo es que *la topología de los ábacos adimensionales está influenciada primordialmente por el factor  $F_p$* . Esto no descarta la posibilidad que existan otros factores, como el origen geológico de los suelos, que afecte la forma de los ábacos; pero la magnitud de la influencia de ese factor -origen geológico de los suelos- es un punto a dilucidar.

Vale destacar que en relación a las “Superficies de Estado” ya mencionadas, se ha comprobado experimentalmente la unicidad de estas superficies en suelos no muy plásticos (que no pueden ser calificados de marcadamente expansivos) y siempre que, tanto los cambios de saturación como de volumen del suelo sean en un solo sentido (Ref. 01). Acotamos que las “Superficie de Estado” son diferentes a los ábacos adimensionales objeto de este trabajo, puesto que las primeras utilizan como variables de estado la “succión” y el “esfuerzo neto”. No obstante, el conocimiento de la unicidad de las primeras nos motiva a plantear la hipótesis de encontrar un patrón de comportamiento en las segundas.

La construcción de esos ábacos, para diferentes valores de  $F_p$  y para diferentes tipos de suelo, se hará para tres valores de esfuerzo normal en cualquiera de los ensayos seleccionados: triaxial, corte directo ó CBR. En este aspecto, reconocemos que una normalización requeriría que tanto las presiones de confinamiento como los ensayos de respuesta se hagan con control de succión, siendo este un elemento que escapa al alcance propuesto; en cambio se asumirá que cada ábaco, caracterizado por un valor único del factor  $F_p$ , desarrollará succiones similares en el espacio **humedad-relación de vacíos**. Cabe recordar que la succión del suelo es, en términos prácticos, la capacidad del suelo para retener agua y podemos aceptar, dentro de los límites de aplicación de este trabajo, que su caracterización está implícita en el factor  $F_p$ .

Cada ábaco constará de 15 puntos en el espacio **humedad-relación de vacíos**, aproximadamente equidistantes a los valores de humedad óptima del Proctor Modificado y con tres valores seleccionados de energía (golpes/capa).

En definitiva, los ábacos adimensionales vienen a ser: Una respuesta de segundo orden en el espacio **relación de vacíos-humedad** para las *muestras paramétricas*; Una respuesta de tercer orden en la construcción de los Mapas de Respuesta a diversas presiones de confinamiento en función a ensayos particulares sobre las *muestras objeto*, donde se incorpora implícitamente las características geológicas del material; Y una respuesta de cuarto orden en la estimación final de parámetros geomecánicos para un valor particular **humedad-densidad** en cada uno de los mapas de respuesta, obtenidos para tres presiones de confinamiento diferentes. Bajo esa perspectiva es que valoraremos que tan determinante pudiera resultar el origen geológico de los suelos en la topología de los ábacos adimensionales; si esa influencia resultara determinante, sólo habría que segregarlos por regiones geológicas, limitando el espectro de casos prácticos donde utilizar los resultados obtenidos.

Podrá observarse que el modelo se presta para elaborar ábacos adimensionales de CBR para diversos tipos de suelo caracterizados por el factor  $F_p$  y para tres niveles distintos de sobrecarga según se evalúen suelos para subrasantes, subbases o bases. Con estos ábacos podrán construirse los respectivos Mapas de Resistencia **humedad-densidad-CBR**, ensayándose solamente una probeta.

## SELECCIÓN DE ENSAYOS Y METODOLOGÍA PROPUESTA

Hasta el momento hemos planteado el modelo en términos generales, de tal manera que los conceptos pueden adecuarse a la ejecución de cualquier ensayo que exija una respuesta mecánica del suelo: triaxiales (resistencia al corte, módulos de deformación, etc.), corte directo (resistencia al corte), CBR, permeabilidad, etc.

A los efectos de la investigación a realizar *a posteriori*, y considerando que en buena parte de los casos prácticos en el uso de suelos de relleno se presentan condiciones de corte no drenado, como por ejemplo la falla de taludes de rellenos, hemos considerado que el ensayo de corte directo (CD; ASTM D3080) en condición consolidado-no drenado (CU), es adecuado para determinar los parámetros de resistencia al corte en términos de esfuerzos totales. Debemos notar que conservamos la convención de denominar el ensayo “consolidado”-no drenado (CD-CU), no obstante que se trata de suelos parcialmente saturados; esa fase de “consolidación” la referimos en este trabajo como la necesaria para que la curva deformación\_normal vs. logaritmo\_tiempo\_transcurrido se estabilice. Como en el ensayo CD no hay control de drenaje, la fase de corte se hará a una velocidad controlada de 2 mm/minuto (mayor al admitido en la norma ASTM D3080), para medir aproximadamente la resistencia al corte no drenado. Desafortunadamente con este ensayo no es posible la determinación del Módulo de Elasticidad, siendo este un aspecto a considerar en futuros trabajos si se utilizaran ensayos triaxiales.

La utilización de los resultados con ensayos CU en condiciones de carga drenadas (CD), como el caso de suelos de relleno para uso estructural (muy típico en la mayoría de desarrollos industriales y habitacionales en el país), pudiera resultar conservador; pero seguramente con valores superiores a los necesarios para evitar fallas por corte en fundaciones superficiales. En estas situaciones prevalece el dimensionamiento de fundaciones por control de asentamientos, en cuyo caso es más importante el conocimiento del Módulo de Elasticidad y del Coeficiente de Poisson.

Importante destacar que los valores a considerar en la representación gráfica de la respuesta al ensayo CD-CU, serán los correspondientes a la **relación de vacíos-humedad** al momento del corte, diferentes a los de remoldeo por el efecto de la fase de “consolidación”.

Igualmente cabe destacar que en los suelos parcialmente saturados sometidos a pruebas de corte sin drenaje, se observa que la envolvente de esfuerzos totales no es una recta, sino una curva que tiende a la horizontal, siendo válido ajustar esta envolvente con una recta para obtener los parámetros de resistencia  $c$  y  $\phi$  en tanto que se considere el mismo intervalo de esfuerzos normales en el problema a tratar. En definitiva, los resultados ajustados para los parámetros de resistencia que se obtengan con los ábacos adimensionales objetos de este trabajo, quedarán restringidos al intervalo de esfuerzos normales con los que se ejecuten los ensayos de corte directo respectivos.

A continuación se presenta en forma sucinta los pasos a seguir en la fase experimental:

- 1.- Localizar diversos materiales de diversos orígenes geológicos, suficientes para obtener al menos 20 puntos Fp, 4 por cada grupo de suelo de acuerdo a la clasificación RAMCODES.
- 2.- Secar y tamizar (tamiz #4 y #200) cada material.
- 3.- Determinar Límites de Consistencia en fracción pasa # 40.
- 4.- Combinación de materiales para obtener diversos Fp. Para verificar la independencia del origen geológico, se obtendrán los mismos puntos para diversos suelos, cuando sea posible.
- 5.- Determinación de Resistencia al Corte, con ensayos seleccionados a tres valores de presión de confinamiento. Se estima realizar unos 900 puntos de resistencia al corte.
- 6.- Construcción de ábacos adimensionales.
- 7.- Validación y ajuste de resultados con ensayos sobre suelos diferentes a los utilizados previamente.

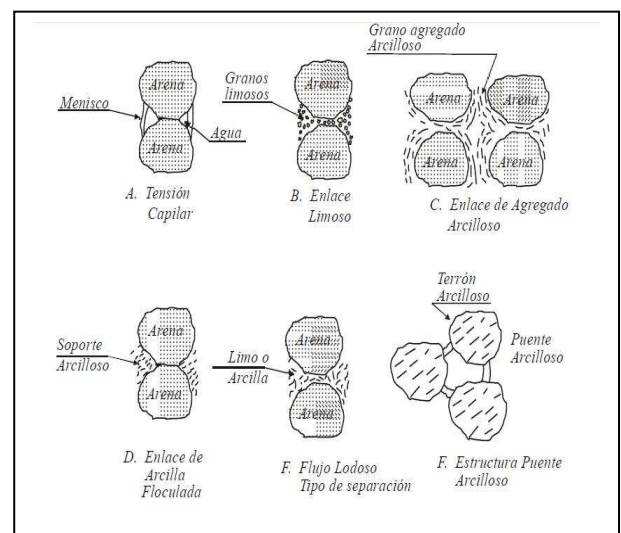
## DISCUSIÓN

Para enmarcar la aplicabilidad de los ábacos adimensionales, y en consecuencia de los Mapas de Resistencia que se deriven de éstos, debemos traer a discusión varios temas implícitamente involucrados en la compactación de suelos de relleno y en la interpretación que puede hacerse de los referidos mapas.

Comenzaremos con el tema asociado a la compactación en la rama seca de los suelos, donde ocurre que para materiales con finos plásticos seguramente se encontrarán las respuestas mecánicas más favorables aún a densidades menores a las máximas del(os) ensayo(s) proctor, al menos cuando la condición preestablecida de humedad se conserve.

La primera implicación al respecto es la asociada con la energía necesaria para lograr ese cometido: aunque en apariencia se requieran menos pases de máquina porque se compactará a valores inferiores de densidad, no puede obviarse el hecho de que eventualmente podrá necesitarse energía adicional (extensión de material y tiempo) para la deshidratación de los materiales. Por otro lado, se sabe de las teorías de compactación que un pequeño incremento de la densidad fuera de la humedad óptima, requiere una gran cantidad de energía adicional para alcanzarla. En este sentido, hasta que los equipos y métodos de compactación en campo no se adecúen para una eficiente manipulación de las relaciones densidad-humedad, no puede aseverarse que resulte conveniente en términos económicos compactar suelos arcillosos en la rama seca a densidades inferiores a las correspondientes con las máximas de los ensayos proctor.

En segundo lugar está presente el hecho ineludible en relación a que suelos arcillosos compactados en la rama seca son potencialmente colapsables. Estos suelos presentan microestructuras de agregados, o con conectores de arcilla (Alonso et al, citado en ref. 05), que ante la succión presentan cierta rigidez y que al saturarse, tenderán a reducir abruptamente el volumen sin aumento de las cargas externas.



**Fig. 03** Estructuras típicas de suelos colapsables (Alonso *et al.*, 1987)

Gibbs y Bara (Figura 04), ofrecen un criterio muy sencillo para evaluar el potencial de colapso partiendo del razonamiento siguiente: un suelo que en estado no saturado posea un volumen de poros suficiente para que, al saturarse, llegue a una humedad que alcance el Límite Líquido, será colapsable (citado en Delage, 1991. Ref. 07).

Este último elemento, potencial de colapso, obliga al proyectista, o bien a limitar la “zona de aceptación” de los Mapas de Resistencia, utilizando el criterio Gibbs y Bara, o bien a asegurar que las propiedades establecidas en el diseño se podrán conservar y en ese sentido deberá ser muy cauteloso al evaluar las condiciones particulares de hidratación: control de drenaje, ubicación del nivel freático, condiciones estacionales y ambientales, etcétera, que pudieran afectar la humedad del relleno a futuro. Al respecto pudiera acudirse al ahora muy extendido uso de geosintéticos.

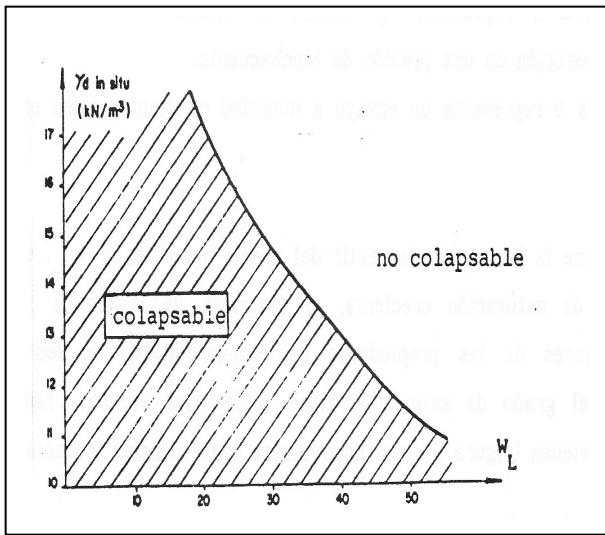


Fig. 04 Estimación de riesgos de colapso (Gibbs y Bara, 1962)

Si bien la saturación es una condición límite que raramente se alcance, el flujo termodinámico del vapor de agua dentro del relleno, si a este se le confinara con barreras artificiales, hará que el suelo finalmente alcance una humedad de equilibrio diferente a la humedad de construcción. En definitiva, el proyectista deberá entender que los Mapas de Resistencia se hacen con condiciones iniciales de humedad y densidad, referidos al proceso constructivo que es sobre el que se tiene control y deberá seleccionar juiciosamente cuales serán las condiciones finales de hidratación y en consecuencia cuales serán los parámetros geomecánicos de trabajo (Ref. 14).

Por otro lado, deberá tenerse presente que los suelos con finos plásticos no presentan una relación unívoca entre humedad y succión, y en consecuencia cabe esperar que no la haya entre humedad y propiedades geomecánicas. Esta ausencia de unicidad entre humedad y succión se observa en los procesos de histéresis en suelos sometidos a procesos de secado y humedecimiento, siendo este un concepto típicamente manejado por los agrónomos. En la figura 05, procedente de Poulouvasilis (1962), citado en ref. 04, muestra las diferentes curvas obtenidas al cambiar el sentido monótono de variación de humedad.

Finalmente, otro tema sujeto a discusión que afecta el comportamiento de suelos remoldeados y la interpretación que puede hacerse de los Mapas de Resistencia, es la microestructura. Estos mapas se hacen en condiciones controladas de humedad-densidad, donde existe una distribución uniforme de la humedad. En cambio, las condiciones reales de hidratación de un relleno dependen de la orientación de las partículas para cada combinación de **humedad-densidad inicial**, y donde los suelos compactados en la rama seca tienden a tener una estructura floculada con permeabilidades de varios órdenes de magnitud mayores a los suelos compactados en la rama húmeda, donde tienden a poseer una estructura dispersa. Así, cabe esperar que los suelos compactados sometidos posteriormente a saturación tengan una diferencia con los resultados que se obtengan del Mapa de Resistencia. Fredy Sánchez Leal encontró para suelos ubicados en la Mesa de Guanipa (Edo. Anzoátegui), que los CBR en condición no hidratada (tomado del Mapa de Resistencia) resultaron un 88,5% de los valores en muestras hidratadas,

siendo más marcada esta tendencia a menor grado de saturación (también hubo valores puntuales mayores al 100%). Esta falta de uniformidad en los resultados, con tendencia del Mapa de Resistencia a subestimar los valores obtenidos de muestras hidratadas (ver fig. 06), pudieran atribuirse a una distribución no uniforme de la humedad en estas últimas, siendo ésta una mera especulación del autor por cuanto no hay evidencias experimentales que soporten tal afirmación.

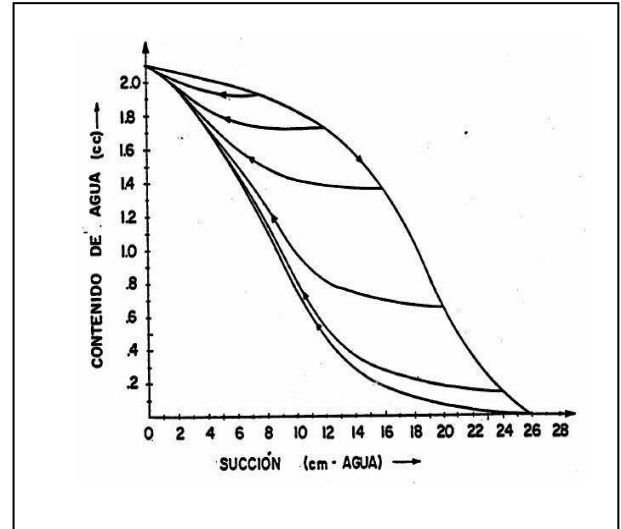


Fig. 05 Histéresis en las curvas succión-humedad en procesos de humedecimiento-secado (Poulouvasilis, 1962)

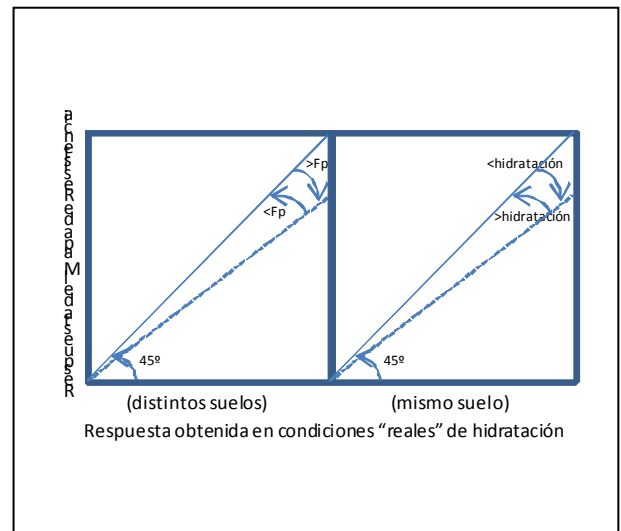


Fig. 06 Correlación de respuestas entre el Mapa de Resistencia y condiciones "reales" de hidratación.

## CONCLUSIONES

Teóricamente puede aproximarse el modelo constitutivo de suelos remoldeados a través del uso de ábacos adimensionales que relacionen las propiedades índices de los suelos (gravedad específica, límite líquido y granulometría) con las propiedades estacionales (densidad y humedad) y la respuesta (resistencia al corte, CBR, módulo de elasticidad, etc.), utilizando para ello el sistema de clasificación cuantitativa propuesto en RAMCODES para suelos con finos plásticos. Este sistema de clasificación ofrece la ventaja de relacionar un valor único (factor  $F_p$ ), en una

escala continua, con la respuesta del material, permitiendo así interpolar linealmente la respuesta de un *suelo objeto* con la correspondiente a dos *suelos paramétricos* adyacentes.

La premisa básica es que *la topología de los ábacos adimensionales en suelos remoldeados con finos plásticos está fundamentalmente afectada por el factor Fp*, quedando la influencia del origen geológico de los suelos como un punto a dilucidar. Adelantamos que la determinación de parámetros de resistencia al corte es una respuesta de cuarto orden en el espacio **densidad-humedad** y que el impacto del origen geológico del suelo se evaluará en este contexto.

Con los ábacos adimensionales podrá “extrapolarse” la respuesta del suelo a varios valores **densidad-humedad** en relación a un solo ensayo a **densidad-humedad** conocida. Haciendo esto para tres valores de esfuerzo de confinamiento, podrán aproximarse valores ( $\phi$ ) y (C) dentro del rango de esfuerzos utilizado en los ábacos.

Con el marco general planteado y utilizando ensayos triaxiales, pudieran construirse ábacos adimensionales de respuesta para determinación de Módulo de Elasticidad para cada esfuerzo vertical. Igualmente, con ensayos de penetración, pudieran obtenerse coeficientes de respuesta para CBR a distintas presiones de confinamiento.

En cuanto al uso que pudiera darse a los Mapas de Resistencia, es importante señalar que la “zona de aceptación” de éstos debe limitarse con el criterio Gibbs y Bara para minimizar el riesgo de colapso en la construcción de suelos de relleno compactados en la rama seca. Además el proyectista deberá considerar que no hay una relación unívoca entre humedad y propiedades mecánicas, dándole una justa interpretación a los resultados y uso de los Mapas de Resistencia.

También deberá considerar que los Mapas de Resistencia se construyen en condiciones iniciales “como compactado” y que la respuesta de los suelos en condiciones reales de hidratación, después de compactado, podrá diferir de los resultados que se obtengan del referido mapa por el efecto de la microestructura. La tendencia de subestimación de las respuestas obtenidas con el Mapa de Resistencia en relación a valores obtenidos en condiciones “reales de hidratación” es mayor en la medida que los suelos tratados sean más impermeables (mayor valor Fp), en tanto que para un mismo suelo, esa tendencia aumenta según disminuya el grado de saturación.

**AGRADECIMIENTO:** a mi socio, Ing. Juan Manuel Holmquist, por sus aportes en diversos intercambios de opiniones técnicas que me han permitido corregir enfoques. Igualmente por su paciente revisión y corrección del texto final.

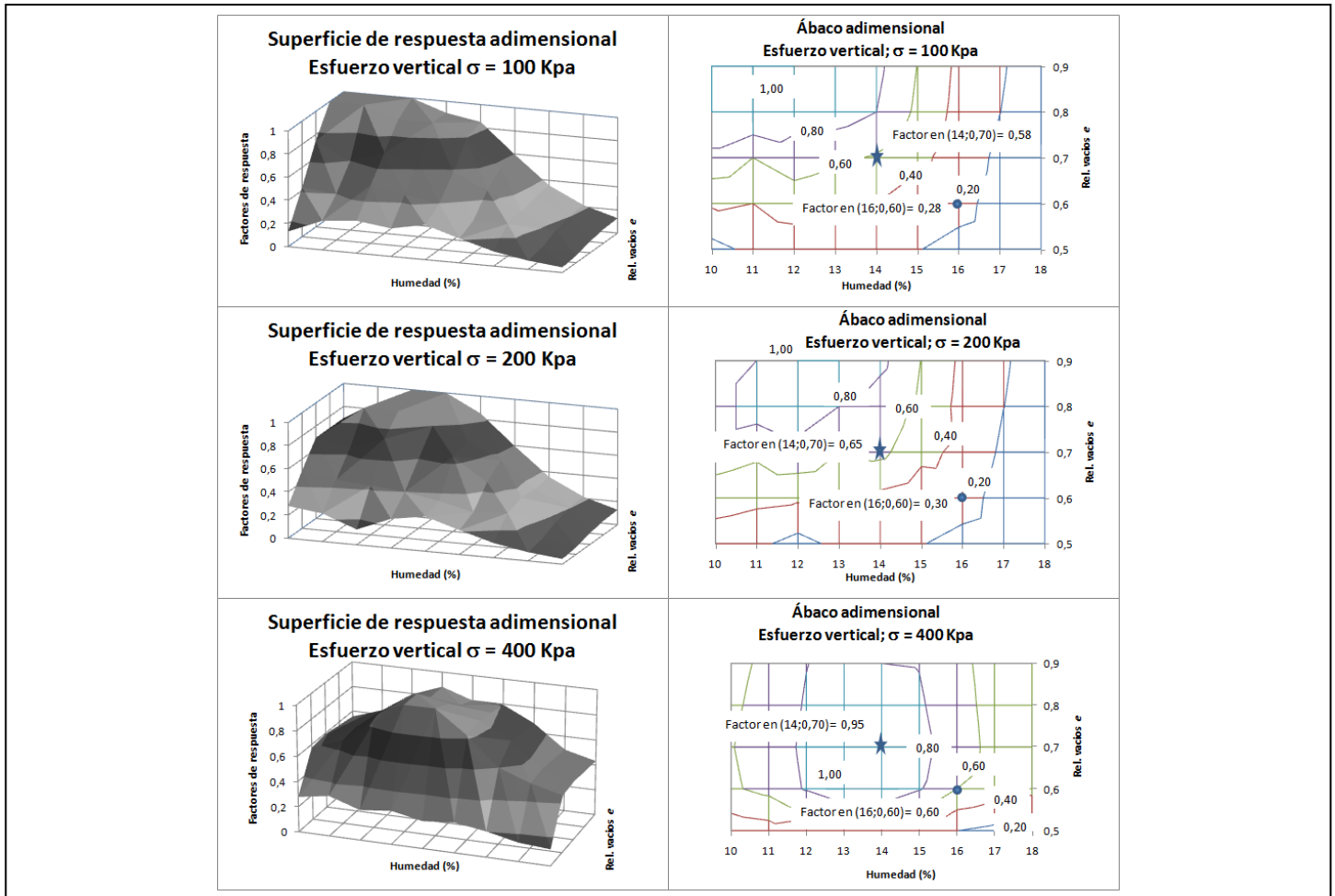
## REFERENCIAS

- [01] Alonso, E. y Lloret, A. (1985) *Comportamiento de suelos parcialmente saturados*. Revista de Obras Públicas Mayo-Junio 1985. Páginas 435 a 461.
- [02] American Society for Testing and Materials (1999) ASTM D1883-99 *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*. USA.
- [03] American Society for Testing and Materials (1998) ASTM D3080-98 *Standard Test Method for Direct Shear test of soils under consolidated drained conditions*. USA.

- [04] Barrera, M. (2002) *Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables*. Ph.D. tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [05] Barrera, M. y Garnica, P. (2002) *Introducción a la mecánica de suelos no saturado en vías terrestres*. Publicación Técnica N° 198, Instituto Mexicano del Transporte IMT. Querétaro, México.
- [06] Delage, P. (1989) *Colapso de un terraplén mal compactado*. Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias. Torremolinos, España.
- [07] Delage, P. (1993) *Obras de tierra compactada*. Curso Internacional Mecánica de suelos para ingenieros, Octubre 1991. IMME, Caracas, Venezuela.
- [08] Lambe, T.W. y Whitman, R.V. (1968) *Soil Mechanics*. John Wiley, New York.
- [09] Rico, A. y del Castillo, H. (2005) *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, No. 1*. Limusa, México.
- [10] Rico, A. y del Castillo, H. (1976) *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, No. 2*. Limusa, México.
- [11] Sánchez-Leal, F., Garnica, P., Gómez, J. y Pérez, N. (2002) *RAMCODES: Metodología Racional para el Analisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados*. Publicación Técnica N° 200, Instituto Mexicano del Transporte IMT. Querétaro, México.
- [12] Sánchez-Leal, F.J. (2007) “A gradation chart for asphalt mixes: Development”. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. Volume 19. No. 2. pag. 185-197.
- [13] Sánchez-Leal, F., (2010) *Manual Digital Seminario Suelos y Mezclas Asfálticas RAMCODES*, Supertraining RAMCODES 2010. Barquisimeto, Venezuela.
- [14] Sánchez Leal, F. (2010). Comunicación personal.
- [15] Santamarina C. y Narsilio, G. (2008) *Clasificación de suelos: fundamento físico, prácticas actuales y recomendaciones*. Conferencia 50 aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia “Estado de la Práctica” en Honor a Gustavo Luis Pérez Guerra, Noviembre 2008. Caracas, Venezuela.
- [16] Schiava, R. y Etse, G. (2004) *Simulación de ensayos empleando el modelo MRS LADE extendido para suelos parcialmente saturados*. Mecánica Computacional Vol. XXIII. Bariloche, Argentina.

## Anexo

Ejemplo de ábacos adimensionales para un suelo hipotético con valor  $F_p$  determinado, sometido a tres esfuerzos verticales



Valores de ensayo para un suelo con el mismo valor $F_p$ :				Predicción para:		
Gs= 2,65; $\gamma_s$ = 25,97 KN/m <sup>3</sup> ; e= 0,70; w=14%; $\gamma_d$ = 15,3 KN/m <sup>3</sup>				Gs= 2,65; $\gamma_s$ = 25,97 KN/m <sup>3</sup> ; e= 0,60; w=16%; $\gamma_d$ = 16,23 KN/m <sup>3</sup>		
(a)	(b= leído de ábaco)	(c= valores ensayo)	(d= c/b)	(e= leído de ábaco)	(f=d)	(g=e * f)
Esf. Vertical (Kpa)	Factor adimensional	Res. Corte (Kpa)	Factor dimensional (Kpa)	Factor adimensional	Factor dimensional (Kpa)	Res. Corte
100	0,58	40	68,97	0,28	68,97	19,31
200	0,65	70	107,69	0,3	107,69	32,31
400	0,95	110	115,79	0,6	115,79	69,47

