

USO DE MAPAS DE RESISTENCIA PARA EL CONTROL DE CALIDAD EN CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES DE SUELOS COHESIVOS

Luis Eloy Feo C. lfeo@ingprego.com / Luis R. Alvarado lalvarador@gmail.com

Ingeniería Geotécnica Prego, C.A.

Caracas, Distrito Capital

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. Está motivado por la reciente aparición de especificaciones de construcción de núcleos de arcilla en presas donde el parámetro de control es la medición de la resistencia al corte no drenado, a diferencia de la convencional medición de densidad en sitio. Es un enfoque novedoso plenamente justificado porque tiende a la medición directa del parámetro geotécnico, en vez de confiar esta medición a un único parámetro que en ocasiones tiene poco o nada que ver con la respuesta del suelo, tal como es la densidad, o peor aún, a un % de compactación sobre un ensayo arbitrario como el ensayo proctor. También es cierto que este enfoque tiene grandes complicaciones, entre las cuales cabe mencionar que los ensayos de resistencia al corte deben hacerse sobre las capas subyacentes, significando potenciales retrasos y sobrecostos por remociones de parejas de capas ya culminadas. Por tal motivo se propone el uso de “mapas de resistencia”, siendo esta una representación tridimensional de los parámetros involucrados en la compleja interacción densidad-humedad-resistencia al corte. De esta manera se cuenta en campo con una herramienta que correlacione las mediciones indirectas de fácil obtención (humedad y densidad), verificándose contra una “región de aceptación” en el “mapa de resistencia” para asegurar el posterior cumplimiento de los valores de resistencia al corte especificados.

INTRODUCCION

Convencionalmente se ha aceptado que el único parámetro importante para el control de calidad de terraplenes es la densidad, perdiéndose de vista que en realidad es la selección arbitraria de un parámetro por lo relativamente sencillo de medir en campo, asumido luego como una medición indirecta de los parámetros que si tienen importancia geotécnica como la resistencia al corte o el módulo de elasticidad. Aún más arbitrario es la comparación relativa a un ensayo de laboratorio que data de los años 30 como lo es el ensayo proctor. Pues bien, esta premisa de asumir una relación lineal entre densidad y respuesta geotécnica es cierta solo para suelos granulares donde predomina la fricción como componente principal de la resistencia al corte, no así en suelos cohesivos donde predomina la permeabilidad como el factor más relevante en la respuesta.

Esta realidad, auspiciada por la disponibilidad de modernos instrumentos de medición, esta siendo reconocida por algunos proyectistas de presas de materiales sueltos y comienzan a verse especificaciones donde el parámetro de control es la medición directa de la resistencia al corte.

Estas especificaciones de construcción acarrearán dificultades operativas que quizás no se identificaron cuando se concibieron y que enumeramos a continuación: 1) Son pocos los instrumentos para una medición confiable de la resistencia al corte no drenado. Los shear vane y penetrometros portátiles ofrecen poca o nula confianza al estar muy influenciados por el operador; tampoco queda un registro físico del ensayo. De

hecho, no hay un método estandarizado para realizar ensayos de resistencia al corte con herramientas manuales. 2) Los instrumentos de mayor precisión fueron concebidos para investigación geotécnica de estratos de arcillas blandas, básicamente lechos lacustres y/o marinos, y entre sus limitaciones se mencionan 4 importantes: a) costo elevado; b) dificultad de movilización entre puntos; c) cada ensayo puede tomar hasta 1 ½ hora; d) necesidad de ensayar con un mínimo de penetración en el estrato de arcilla. 3) Sobre la última mención surge una gran dificultad para adaptar estos equipos de medición precisa al control de calidad en la construcción de terraplenes y no es otra sino la necesidad de ensayar las capas subyacentes con las consecuencias que acarrearán los ensayos fallidos, tal como la remoción y compactación de al menos dos capas ya culminadas.

Hay otras dificultades de menor importancia que están asociadas a la microestructura del suelo y al poco volumen de material que se involucra en cada punto de ensayo de resistencia al corte no drenado. Estas dificultades, que pudieran causar dispersión en los resultados y llamar la atención en la interpretación de estos, son las siguientes: 1) distribución irregular de la humedad; 2) presencia puntual de vacíos en las capas por el efecto del equipo “pata de cabra”; 3) presencia puntual de partículas gruesas. Nótese que estos factores están atenuados en los controles por medición de densidad.

De todo lo anterior surge la necesidad de contar con herramientas de campo que faciliten el manejo de datos, la interpretación y predicción de resultados con la medición de

propiedades de fácil obtención en campo como la densidad y la humedad. En tal sentido hemos acudido a las herramientas que nos ofrece RAMCODES®¹, particularmente a los mapas de resistencia, que son una particularidad de los mapas de respuesta y sobre los cuales ahondaremos a continuación.

MAPAS DE RESISTENCIA. Experimento factorial

La compleja interacción de factores que afectan la respuesta de un suelo amerita el uso de herramientas gráficas y técnicas estadísticas para evaluar su comportamiento.

Por ejemplo, se encuentra en la literatura el uso de las “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 $(\sigma-pa)$ y $(pa-pw)$, donde: $(\sigma-pa)$ = esfuerzo neto, esfuerzo total menos presión de aire de poros y $(pa-pw)$ = 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).

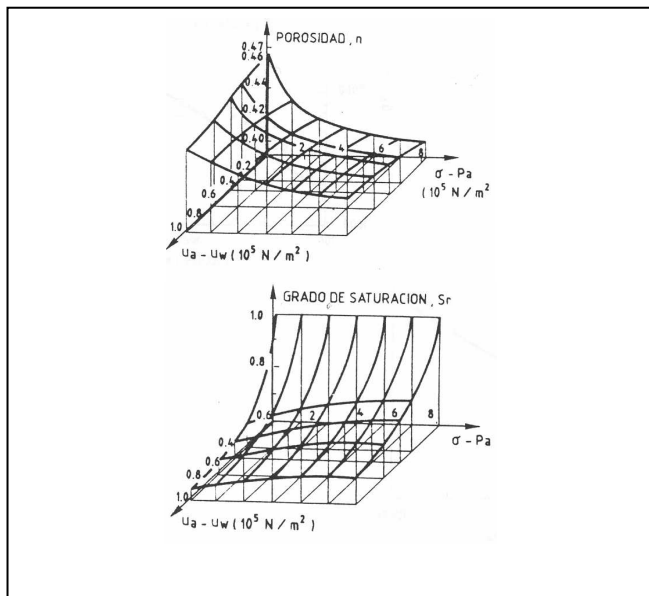


Fig. 01. Superficie de estado para e y Sr (Matyas y Radhakrishna, 1968)

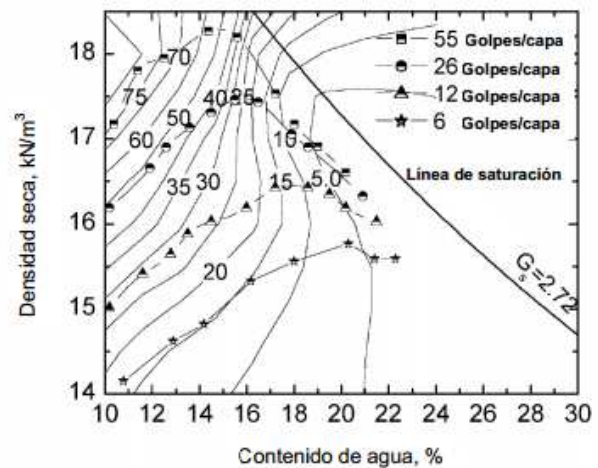
Por otro lado, las técnicas estadísticas de análisis que permite estudiar la influencia de varios factores o variables en la respuesta medida en un experimento se denominan experimentos factoriales. Estos se usan con gran efectividad en

la optimización del diseño de producciones industriales combinando métodos gráficos con el estudio de superficies de respuesta en la interpretación de resultados.

La evaluación de los resultados se realiza por medio de software de graficación (Origin, Surfer, AutoCAD, etc.), que permiten trazar gráficos con curvas de nivel, ajustadas estadísticamente, y que expresan la variación de las respuestas con las variables evaluadas. Se obtiene así una representación plana de superficies tan complejas como las indicadas en la figura 01, tal como se hace con los planos topográficos.

Para la evaluación de la relación entre el contenido de agua, la densidad seca y la resistencia, Sánchez-Leal, F.J., 2002b propuso 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.

La figura 02 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. Obsérvese en este caso que las respuestas (i.e. CBR) mayores se obtienen para la combinación de bajos contenidos de agua y altas densidades. Esta representación es muy práctica y tiene 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.



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

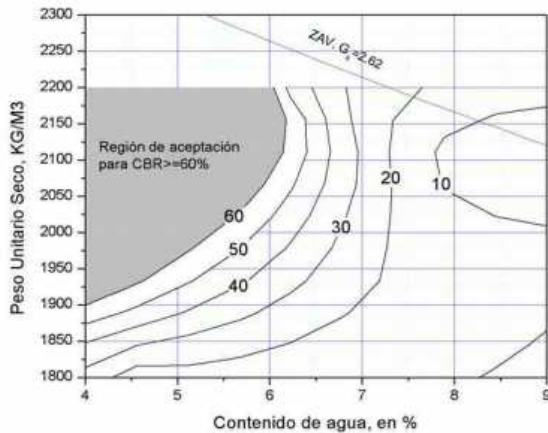
Fig.02

La aplicación más significativa de los mapas de resistencia es que se pueden construir “regiones de aceptación” para el control de compactación de campo, tal como se muestra en la figura 03.

Para el caso que nos ocupa, las mediciones en campo de densidad (ó % de compactación sobre un valor proctor) y de humedad (relativa o no a la humedad óptima respectiva) pudieran utilizarse para correlacionar la respuesta que en este

¹ Ramcodes es marca registrada y el lector interesado podrá ahondar sobre sus fundamentos visitando www.ramcodes.com

caso sería la resistencia al corte no drenado. Estas mediciones permiten ir construyendo un mapa donde se define una “región de aceptación” en el espacio densidad-humedad para el cual se obtiene una adecuada resistencia al corte no drenado. Como se verá más adelante, y para considerar todo el espectro de suelos disponibles en una obra, quizás sería más conveniente utilizar un espacio parametrizado: (% de compactación - puntos sobre Ho) ó inclusive (relación de vacíos – saturación), sobre el cual se determine la resistencia al corte no drenado.



Región de aceptación para arena limosa de Bare-8, Anzoátegui, Venezuela
Fig. 03

En un principio estos mapas, y la correspondiente “región de aceptación”, no llegan a sustituir a los ensayos directos de resistencia al corte, pero si permiten tener confianza para la liberación de capas. Una vez perfeccionada la construcción de los mapas con múltiples ensayos, y sobre diversos suelos en una misma obra, esta confianza pudiera conducir a minimizar los ensayos directos de resistencia al corte, impactando favorablemente en los tiempos de ejecución.

absolutos (Figuras 05 y 06; humedad-densidad-resistencia al corte) y en valores relativos (Figura 07; puntos sobre Ho-%compactación-resistencia al corte).

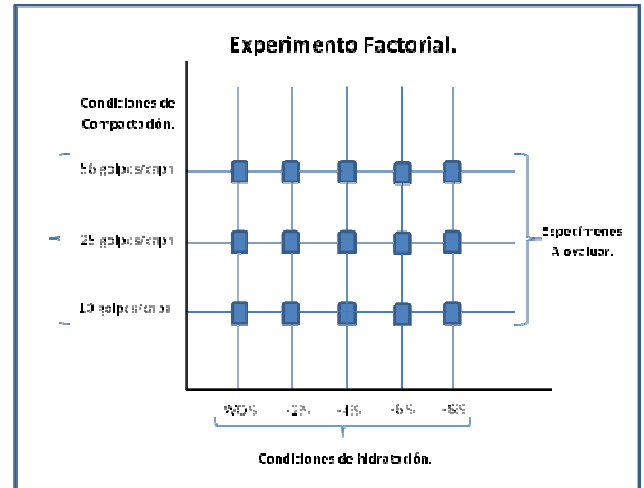


Fig. 04

Identificación	Humedad (%)	Densidad Seca (Kg/m³)	Resistencia al Corte no drenado (Kpa)	Dif. % hum-ho	% compactación
56-1	28,02	1511,83	148,00	-0,58	103,66
56-2	30,07	1455,42	130,00	1,47	99,79
56-3	31,19	1443,00	100,00	2,59	98,94
56-4	33,91	1367,91	68,00	5,31	93,79
56-5	37,49	1304,87	36,00	8,89	89,47
25-1	27,13	1470,51	204,00	-1,47	100,82
25-2	28,53	1472,77	186,00	-0,07	100,98
25-3	31,44	1415,15	98,00	2,84	97,03
25-4	31,53	1414,15	92,00	2,93	96,96
25-5	37,70	1296,07	36,00	9,10	88,86
12-1	25,80	1340,03	196,00	-2,80	91,88
12-2	28,81	1389,14	152,00	0,21	95,24
12-3	29,85	1396,17	144,00	1,25	95,73
12-4	34,59	1350,51	60,00	5,99	92,60
12-5	35,36	1339,34	58,00	6,76	91,83

Tabla 01

DATOS REALES DE UN EXPERIMENTO FACTORIAL

Se realizó un experimento factorial sobre un limo arcilloso obtenido de un acopio de material seleccionado para la construcción del núcleo de una presa, caracterizado con los siguientes parámetros: 70% pasa T200, índice de plasticidad=24, Wopt= 28.6% y DMS=1458.5Kg/m3.

La muestra utilizada se homogenizó, se cuarteó y se secó al aire. Se prepararon 15 especímenes compactados a diferentes humedades y varios niveles de compactación con el martillo estándar en el molde proctor de 6". Ver figura 04.

En esta ocasión, y considerando que es un material controlado, se obtuvieron los resultados de resistencia al corte con un instrumento manual marca Geonor, modelo H-60, con la veleta de 16 x 32 mm, a una profundidad de 10 cm. Los resultados pueden apreciarse en la tabla 01.

Con estos datos se elaboraron los mapas de resistencia con Origin, versión 8.6 (www.originlab.com), representándose curvas de iso-valores de resistencia, expresados en valores

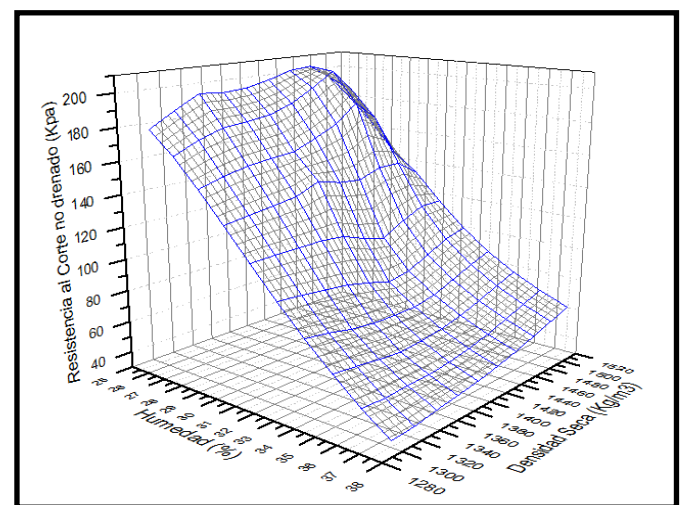


Fig. 05. Superficie de resistencia al corte no drenado (kpa); suelo homogéneo, valores absolutos

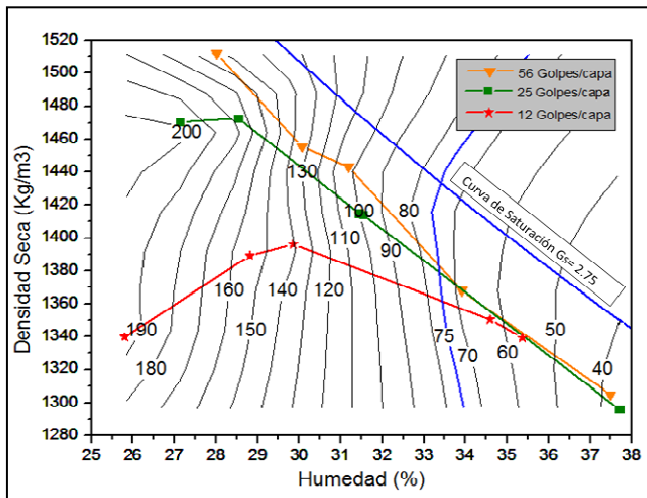


Fig. 06. Mapa de resistencia al corte no drenado (kpa); suelo homogéneo, valores absolutos

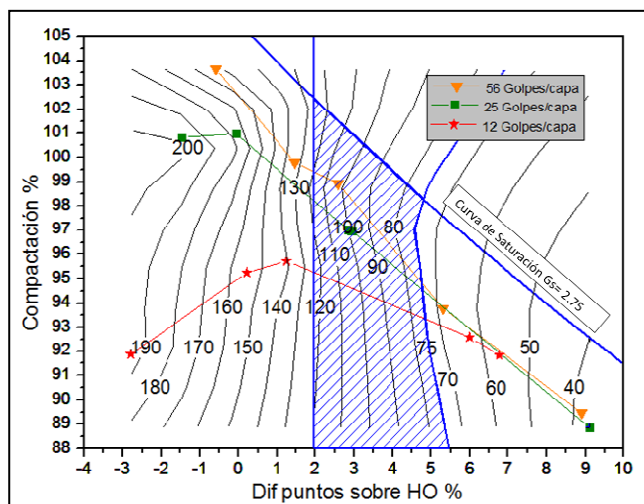


Fig. 07. Mapa de resistencia al corte no drenado (kpa); suelo homogéneo, valores relativos

DATOS REALES DE UN TERRAPLÉN DE PRUEBA

A continuación se presentan los resultados obtenidos en un terraplén de prueba con el material extraído directamente del mismo acopio citado en el punto anterior, sin ningún tratamiento previo. Los parámetros característicos, obtenidos de 9 ensayos, se presentan en la tabla 02.

Previamente a la construcción del terraplén se acondicionó el terreno de fundación, constituido por aglomerados basálticos, nivelando con una motoniveladora CAT 140M y compactando con 12 pases de un rodillo liso HAMM 3520, con vibración. Se continuó colocando una primera *capa de nivelación* con el mismo suelo y luego una segunda *capa base* con idéntica compactación: extensión a 30 cm de espesor por 20m ancho y 40m de largo, 12 pases de equipo “Pata de cabra” 815F y sellado con rodillo liso HAMM 3520, sin vibración.

	Índice de Plasticidad	Gradación (% pasante)		
		100 (%)	3/4 (%)	N200 (%)
Promedios	24,3	100,00%	100,00%	73,30%
Desv. Estándar	3,2	0,00%	0,00%	10,39%
Coef. Asimetría	-0,04	N/A	N/A	-0,42
Coef. Variación	13,32%	0,00%	0,00%	14,17%
Mínimo	19,0	100,00%	100,00%	58,37%
Máximo	29,0	100,00%	100,00%	83,34%
Rango	10,0	0,00%	0,00%	24,97%

Tabla 02

Se inició el terraplén extendiendo capas de 22.5 cm con un tractor CAT D-6, mezclando y arando con una rastra con discos de 80 cm de diámetro, tirada por un tractor agrícola o por un D-6. Durante el proceso se determinaron periódicamente los parámetros proctor y se tomaron muestras tanto en el acopio como durante el extendido para el control de humedad, procurando la colocación del suelo con al menos 2 puntos por encima de la humedad óptima; a tal efecto se dispuso de un camión cisterna dotado con aspersores para la incorporación de humedad. En la tabla 03 se muestran los resultados para el control de humedad durante la construcción. Al culminar la segunda capa se selló con rodillo liso sin vibración y se iniciaron los ensayos y el muestreo.

Muestra	Procedencia	%Humedad natural	%Humedad Óptima	Diferencia
1147	Test Fill C1-1.1	32,5	28,6	3,9
1148	Test Fill C1-1.2	32,0	28,6	3,4
1149	Test Fill C1-1.3	33,8	28,6	5,2
1150	Test Fill C1-1.4	28,7	28,6	0,1
1151	Test Fill C1-2.1	30,7	27,3	3,4
1152	Test Fill C1-2.2	30,3	27,3	3,0
1153	Test Fill C1-2.3	30,1	27,3	2,8
1154	Test Fill C1-2.4	30,4	27,3	3,1
1183	Test Fill C2-1.1	33,9	29,5	4,4
1184	Test Fill C2-1.2	31,8	29,5	2,3
1185	Test Fill C2-1.3	34,1	29,5	4,6
1186	Test Fill C2-1.4	34,3	29,5	4,8
1187	Test Fill C2-2.1	30,8	29,0	1,8
1188	Test Fill C2-2.2	31,4	29,0	2,4
1189	Test Fill C2-2.3	31,9	29,0	2,9
1190	Test Fill C2-2.4	30,9	29,0	1,9
1275	Test Fill C3-1.1	32,7	28,6	4,1
1276	Test Fill C3-2.1	36,9	28,6	8,3
1277	Test Fill C2-2.2	35,2	28,6	6,6
1278	Test Fill C2-2.3	35,5	28,6	6,9
1280	Test Fill C2-2.4	32,3	28,6	3,7

Tabla 03

La resistencia al corte no drenado se determinó con equipo ROCTEST VANE BORER M-1000 (ver detalles en www.roctest-group.com), siguiendo en lo que cabe a la norma ASTM D-2573. Fue necesario hacer una adaptación para facilitar la movilización entre puntos; ver imagen 01.

Cada resultado de resistencia al corte consta de tres valores, ensayados en puntos equidistantes (aproximadamente 50 cm) y a una profundidad de 40 cm, penetrando aproximadamente 20 cm en la capa subyacente.

En cada punto de ensayo se tomaron muestras para determinar la humedad natural en horno (ASTM D-2216). Para cada ubicación (abarca 3 puntos de ensayo), se tomaron muestras para proctor estándar (ASTM D-698); granulometría (ASTM C-117/C-136); límites de consistencia (ASTM D-4318); se determinó la densidad en sitio con cono de arena (ASTM D-1556) y con densímetro nuclear (ASTM D-5195).



Imagen 01

Así se avanzó con la construcción del terraplén, ensayando la segunda capa al culminar la tercera y esta al terminar la cuarta y última. En cada capa se realizaron ensayos de corte en dos ubicaciones diferentes (3 puntos cada ensayo), para un total de seis ensayos. En la tabla 04 se presentan los resultados.

Identificación	Vane Shear Strength (Kpa)	VSS promedio (Kpa)	% humedad(1)	Densidad seca (cono) (kg/m3)	ASTM D698		Dif. % hum-ho	% compactación
					DMS (kg/m3)	Ho (%)		
1: Capa1-zona1	153.4	132.4	28,7	1274.6	1458.3	28.6	0.1	87.4
	133.7							
	110.1							
2: Capa1-zona2	37.4	58.4	30,4	1282.8	1482.9	27.3	3.1	86.5
	49.2							
	88.5							
3: Capa2-zona1	141.6	163.2	31,8	1419.3	1448.4	29.5	2.3	98.0
	173.0							
	175.0							
4: Capa2-zona2	180.9	181.6	30,9	1397.8	1456.2	29.0	1.9	96.0
	182.9							
	180.9							
5: Capa3-zona1	129.8	132.4	32,7	1409.3	1438.9	29.8	2.9	97.9
	143.5							
	123.9							
6: Capa3-zona2	35.4	55.1	35,5	1375.4	1470.5	28.0	7.5	93.5
	25.6							
	104.2							

Nota (1): corresponde al promedio de tres puntos.

Tabla 04

Con esta información se construyeron los mapas indicados en las figuras 08 (valores absolutos) y 09 (valores relativos), superponiendo la línea teórica de saturación correspondiente al promedio de los proctor y para una gravedad específica única (ASTM D-854) de 2.75 gr/cm3.

Al finalizar el terraplén se abrieron trincheras en sentido longitudinal (12 m) y transversal (9 m), verificándose visualmente la uniformidad y una adecuada unión intercapa. Excepcionalmente se encontraron sectores con vacíos como se aprecia en la imagen 02.

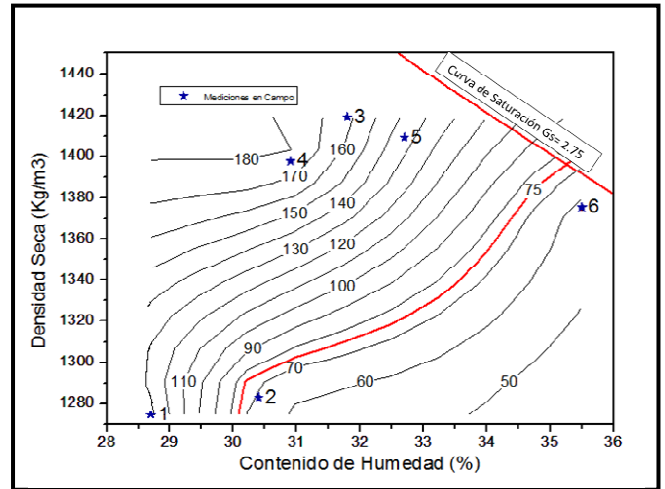


Fig. 08. Mapa de resistencia al corte no drenado (kpa); terraplén de prueba, valores absolutos

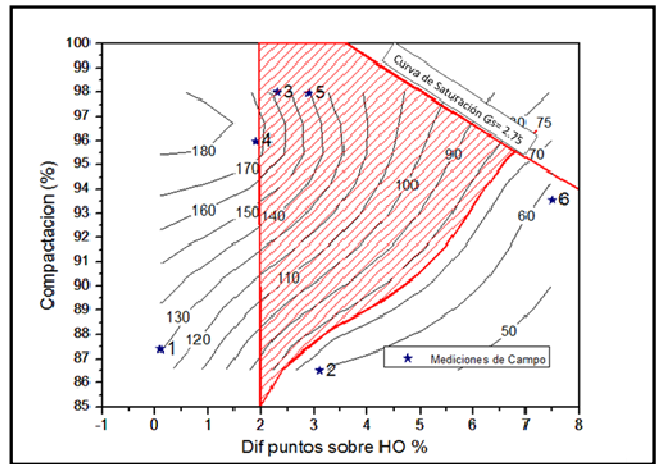


Fig. 09. Mapa de resistencia al corte no drenado (kpa); terraplén de prueba, valores relativos



Imagen 02. Vacíos presentes en terraplén de prueba

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se han considerado unas especificaciones de proyecto con un valor mínimo de 75 kpa con restricciones de compactación en la rama húmeda, a 2 puntos por encima de la humedad óptima. Estas especificaciones se han señalado en las figuras 07 y 09, definiéndose así una “región de aceptación” que queda restringida por la curva teórica de saturación.

Del experimento factorial con un material homogéneo (figuras 05, 06 y 07) se observa que la resistencia al corte no drenado básicamente depende del contenido de humedad, excepto en la rama seca y compactación cercana al 100%. Este es un comportamiento predecible de la teoría de suelos parcialmente saturados, donde la succión representa un componente importante en la respuesta del suelo. El rango de humedades a los que puede manejarse este material para satisfacer la especificación puede extenderse hasta 5.5 puntos por encima de la humedad óptima, con compactaciones superiores al 88% del proctor estándar.

Nótese que el programa de graficación hace ajustes a los datos singulares. Por ejemplo, en la figura 06 (tabla 01) hay ajustes en la representación de la resistencia al corte para el punto 25-2.

Para el análisis de la información obtenida del terraplén de prueba, llamamos la atención en cuanto a que los resultados de resistencia al corte (1 de cada 3), pudieran estar influenciados por la microestructura, la distribución puntual de humedad, presencia de partículas grandes o imperfecciones como las indicadas en la imagen 02. No ocurre lo mismo con las mediciones de humedad y densidad puestos que estas reflejan el promedio para el sitio.

Según lo anterior, atendiendo la dispersión que resulta en las mediciones de resistencia al corte, es recomendable verificar los valores extremos antes de promediarlos, utilizando a tal efecto un criterio como las tablas científicas GEIGY cuya fórmula se transcribe a continuación, limitando el resultado para un 95% de confianza en la muestra:

$$\frac{(X_N) - (X_{N-1})}{(X_N) - (X_1)} \leq 0.941$$

Siendo X_N el extremo que se quiere verificar, $X_{(N-1)}$ el valor intermedio y X_1 el valor opuesto. De esta verificación resulta la información contenida en la tabla 05.

Esta verificación debe hacerse en campo y en caso de no lograrse satisfacer el criterio de valores extremos, es necesario tomar densidades y humedades en los puntos singulares. Las densidades deben tomarse con cono de arena (ASTM D-1556), resguardando inmediatamente las muestras para los ensayos de humedad en horno (ASTM D-2216).

La inspección del mapa de resistencia para el terraplén de prueba en valores absolutos (figura 08), señala claramente una tendencia directamente proporcional tanto al aumento de densidad como a la disminución de la humedad. Esta tendencia sugiere la presencia de una gama importante de suelos dentro del acopio, a pesar de la relativa uniformidad que señalan los datos de la tabla 02, de tal manera que suelos con mayor contenido de arena tienden a una mayor densidad y una

respuesta más favorable a la resistencia al corte no drenado. El programa de graficación debió ajustar los resultados 2 y 4.

Identificación	Vane Shear Strength (Kpa)	Extremo inferior	Extremo superior	Valor
1: Capa1-zona1	153.4	0.54	0.45	Ok
	133.7			
	110.1			
2: Capa1-zona2	37.4	0.23	0.77	Ok
	49.2			
	88.5			
3: Capa2-zona1	141.6	0.94 (límite)	0.06	Ok
	173.0			
	175.0			
4: Capa2-zona2	180.9	0.0	0.0	Ok
	182.9			
	180.9			
5: Capa3-zona1	129.8	0.30	0.70	Ok
	143.5			
	123.9			
6: Capa3-zona2	35.4	0.12	0.88	Ok
	25.6			
	104.21			

Tabla 05; verificación de valores extremos

Cuando los datos del terraplén de prueba se representan en valores relativos a los parámetros proctor (figura 09), se observa que la interacción de la humedad y densidad en la resistencia al corte es algo más compleja, notándose una relativa independencia de la resistencia al corte respecto a la humedad, para valores de compactación superiores al 94% y acentuándose la tendencia a “curvarse” del lado seco por la influencia de la succión. Este gráfico solo requirió ajuste en el resultado del ensayo 5.

También puede verse en la figura 09 que para la gama de suelos utilizados en el terraplén de prueba, el rango de humedades puede extenderse hasta 6.5 puntos por encima de la humedad óptima pero garantizando densidades que queden en la “región de aceptación”.

CONCLUSIONES

El uso de herramientas gráficas como los mapas de respuesta permite analizar tendencias y comprender comportamientos complejos como la resistencia al corte en suelos con finos plásticos. Permiten visualizar lo que parece obvio pero que en la práctica se olvida: la respuesta geotécnica no depende solamente de la densidad ni de la humedad sino de ambas, actuando simultáneamente.

Estos mapas de respuesta pueden adaptarse a diversas situaciones y especificaciones de construcción que en el caso particular de la construcción de núcleos impermeables para presas puede ser un mapa de resistencia al corte no drenado cuyas variables independientes sean la humedad y la densidad.

Para la construcción fiable de los mapas se requieren mediciones puntuales de densidad-humedad, a menos que todos los resultados de resistencia al corte no drenado en un sitio determinado sean uniformes; en ese caso es válido tomar un

solo dato de densidad-humedad y promediar los resultados de resistencia al corte.

Cuando se disponen de especificaciones constructivas, los mapas pueden elaborarse inicialmente con el terraplén de prueba y luego continuar alimentándolos y perfeccionándolos según se van obteniendo mediciones continuas. Pueden utilizarse para el control rápido en campo, permitiendo tener confianza en la liberación preliminar de capas o actuando para ajustar la densidad o la humedad. En una etapa avanzada de la obra, cuando se demuestre la fiabilidad de los mismos, de acuerdo a los materiales y procedimientos utilizados, pudieran utilizarse inclusive para la aceptación final de capas.

Igualmente, los mapas de resistencia pueden utilizarse en la fase de diseño, en cuyo caso el procedimiento debe partir de la realización de experimentos factoriales para adaptar luego en terraplenes de prueba. Este enfoque permite optimizar el diseño, conduciendo a especificaciones constructivas más flexibles y eficaces.

Los mapas de resistencia para el control en campo son más útiles y confiables si se emplea un espacio parametrizado como puntos sobre proctor Vs. % de compactación. Para el diseño sería aún más recomendable si se utiliza relación de vacíos Vs. saturación por cuanto en esta fase no existe la limitación que impone la determinación de un parámetro determinante como la gravedad específica.

REFERENCIAS

- [01] Sánchez-Leal, F., (2010) *Manual Digital Seminario Suelos y Mezclas Asfálticas RAMCODES*, Supertraining RAMCODES 2010. Barquisimeto, Venezuela.
- [02] Sánchez Leal, F. (2010). Comunicación personal.
- [03] 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.
- [04] American Society for Testing and Materials (2007) ASTM D698-07 *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. USA.
- [05] American Society for Testing and Materials (2006) ASTM D2573-01 *Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil*. USA.
- [06] Alvarado, L. y Useche, J. (2004) *Sistematización del Uso de la Metodología RAMCODES® para el Análisis de un Material de Préstamo*. Barquisimeto, Venezuela.
- [07] American Society for Testing and Materials (2002) ASTM D5195-02 *Standard Test Method for Density of Soil and Rock In-Place at Depths Below the Surface by Nuclear Methods*. USA.
- [08] Barrera, M. (2002) *Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables*. Ph.D. tesis, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

- [09] 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.
- [10] Sánchez-Leal, F., Garnica, P., Gómez, J. y Pérez, N. (2002) *RAMCODES: Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados*. Publicación Técnica N° 200, Instituto Mexicano del Transporte IMT. Querétaro, México.
- [11] Delage, P. (1993) *Obras de tierra compactada*. Curso Internacional Mecánica de suelos para ingenieros, Octubre 1991. IMME, Caracas, Venezuela.
- [12] Delage, P. (1989) *Colapso de un terraplén mal compactado*. Simposio sobre el agua y el terreno en las infraestructuras viarias. Torremolinos, España.
- [13] Alonso, E. y Lloret, A. (1985) *Comportamiento de suelos parcialmente saturados*. Revista de Obras Públicas Mayo-Junio 1985. Páginas 435 a 461.
- [14] Lambe, T.W. y Whitman, R.V. (1968) *Soil Mechanics*. John Wiley, New York.