

INFLUENCIA DEL METODO DE COMPACTACION EN LA RESISTENCIA AL CORTE DE UN SUELO RESIDUAL

EFFECT OF COMPACTION METHODS ON THE SHEAR STRENGTH OF A RESIDUAL SOIL

J.Ortas y D. Salcedo
Universidad Simón Bolívar
Caracas, Venezuela.

RESUMEN

El trabajo evalúa la influencia de los métodos de compactación por amasado, impacto, y estático, en el comportamiento de un suelo residual producto de la meteorización de un esquisto micáceo cuarzoso, litología frecuente en la Cordillera de la Costa Venezolana. Mediante un extensivo programa de ensayos de laboratorio y la evaluación de la estructura de las muestras compactadas mediante el microscopio electrónico, se concluye que dicha estructura y el método de compactación tienen una influencia decisiva en la resistencia no drenada del suelo determinada a bajas deformaciones. Por otra parte la resistencia al corte efectiva del suelo, expresada mediante teorías convencionales y mediante la teoría de Hvorslev, aparenta ser independiente del método de compactación y de la estructura que adquiere la muestra al ser compactada.

INTRODUCCION

En gran parte de la vialidad y en la construcción de desarrollos urbanísticos en Venezuela, se utilizan como materiales de préstamo, suelos residuales producto de la meteorización en sitio de rocas metamórficas. El objetivo del trabajo fue estudiar la influencia de las condiciones de compactación en el comportamiento de un suelo residual proveniente de una roca metamórfica muy frecuente en la Cordillera de la Costa Venezolana. Investigaciones previas realizadas en suelos de otros crígenes, publicadas por Seed and Chan (1957), Lambe (1958) y Seed, Mitchell and Chan (1960), sirvieron de motivación y fundamento para la presente investigación.

La investigación realizada comprendió ensayos de compactación por métodos de amasado, impacto y presión estática tanto en moldes grandes como en moldes miniatura, determinándose la resistencia CBR en muestras tanto en su condición tal como fue compactada como en condición saturada, ensayos de compresión sin confinar, ensayos

triaxiales convencionales UU y CU, ensayos triaxiales secuenciales, y ensayos de corte directo drenados. Asimismo, se realizaron observaciones de la estructura de las diferentes muestras compactadas mediante el microscopio electrónico. En este trabajo solo se presentan los resultados parciales de una parte de la investigación en las muestras compactadas en molde miniatura, evaluando la resistencia al corte sin drenar mediante ensayos de compresión sin confinar y triaxiales UU, y la resistencia al corte drenada mediante ensayos de corte directo interpretados en la forma convencional y en términos de la teoría de Hvorslev.

CARACTERISTICAS DEL SUELO INVESTIGADO

El suelo investigado presenta un típico color rojizo y proviene de la meteorización in situ de un esquisto micáceo cuarzoso con trazas de microclino. De acuerdo al análisis químico y según la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, el suelo se clasifica como no laterítico. Las propiedades básicas del suelo investigado son las siguientes:

% pasante tamiz # 40:	92%-94%
% de finos:	70%-80%
% < 0.001 mm	30-32%
Límite Líquido:	43-47%
Índice de Plasticidad:	13-18%
Límite de contracción:	19.70-21.35
Peso específico promedio:	2.877
Clasificación Unificada:	ML

Para la investigación se tomaron unos 1000 kg de muestras de suelo, las cuales fueron apilonadas sobre lonas disgregando gentilmente los terrones. Luego el material fue mezclado considerablemente y expuesto para su secado al aire. Seguidamente se procedió a tamizarlo por el tamiz # 4 y mezclarlo nuevamente. Después de una semana de exposición al aire y procesos de mezclado, se determinó su humedad y se introdujo en diferentes bolsas plásticas debidamente cerradas.

Con el fin de evitar la posible influencia del tiempo de curado en el comportamiento del suelo, se decidió establecer para la elaboración de las probetas, un tiempo de curado de 24 horas después de haber sido humedecidas a un contenido de humedad deseado. En general los ensayos para determinación de la resistencia al corte, se realizaron entre 1/2 hora y 1 hora después de elaborado la probeta compactada.

MÉTODOS DE COMPACTACION

Las muestras del suelo investigado fueron compactadas por amasado, impacto, y con presión estática.

La compactación por amasado se realizó en un equipo Harvard Miniatura diseñado por Normatest, originalmente propuesto por Wilson (1950). La compactación estática también se realizó en muestras compactadas en el equipo Harvard Miniatura, para lo cual fue necesario diseñar y fabricar piezas especiales que permitieran la aplicación de la carga simultáneamente por la parte inferior y superior de la probeta. El procedimiento utilizado se fundamentó en el mismo publicado para pruebas estáticas en molde de 6" (Rico y Del Castillo, 1974). Para la compactación por impacto en el molde Harvard, se diseñó y fabricó un martillo con un peso y dimensiones tales que compactando el suelo en 5 capas, se pudieran obtener energías equivalentes a los ensayos AASHTO T-99 y T-180.

Cabe destacar que para los métodos de compactación investigados, las curvas de compactación obtenidas con molde grande y con molde miniatura, resultaron para fines prácticos muy similares.

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Con el fin de investigar la influencia aislada del método de compactación en la relación esfuerzo-deformación y en la resistencia al corte del suelo, se realizaron diferentes ensayos de compactación en el molde miniatura, hasta lograr que por los tres métodos utilizados (amasado, impacto, estático) se obtuviera aproximadamente la misma curva de compactación. Las primeras pruebas revelaron que con presiones estáticas de 750 lb/pulg², se obtenía una curva similar al método miniatura de impacto cuando se utilizaban 22 golpes y 5 capas. Para el método de amasado, aun utilizando 10 capas y 65 golpes por capa se obtenían densidades muy por debajo que las alcanzadas por el método de impacto (22 G/5 capas) y por el método estático (750 lb/pulg²). Por este motivo se decidió cambiar la forma de aplicación de golpe, y en lugar de aplicarlo con una ligera compresión del resorte del 40 lbs, como lo sugiere Wilson (1950), se decidió comprimirlo completamente. Con este sistema se obtuvo una curva similar a las anteriores, con 20 golpes y 10 golpes por capa. En la Figura 1 se muestra la curva común obtenida por los tres métodos de compactación.

El programa de ensayos para evaluar la resistencia al corte incluyó la determinación de la resistencia a la compresión sin confinar, ensayos triaxiales UU y CUpp, ensayos triaxiales secuenciales y ensayos de corte directo drenados (Ortas, 1994). A continuación solo se presentan los resultados de algunos de estos ensayos.

Ensayos de compresión sin confinar

La Figura 1 muestra los resultados de los ensayos de compresión sin confinar para todas las muestras compactadas por los diferentes métodos en su condición tal como fueron compactadas. Puede verse que la tendencia general es la misma para todos los métodos, con mayores resistencias en la rama seca que decrecen progresivamente hacia la rama húmeda. La disminución de resistencia es significativa,

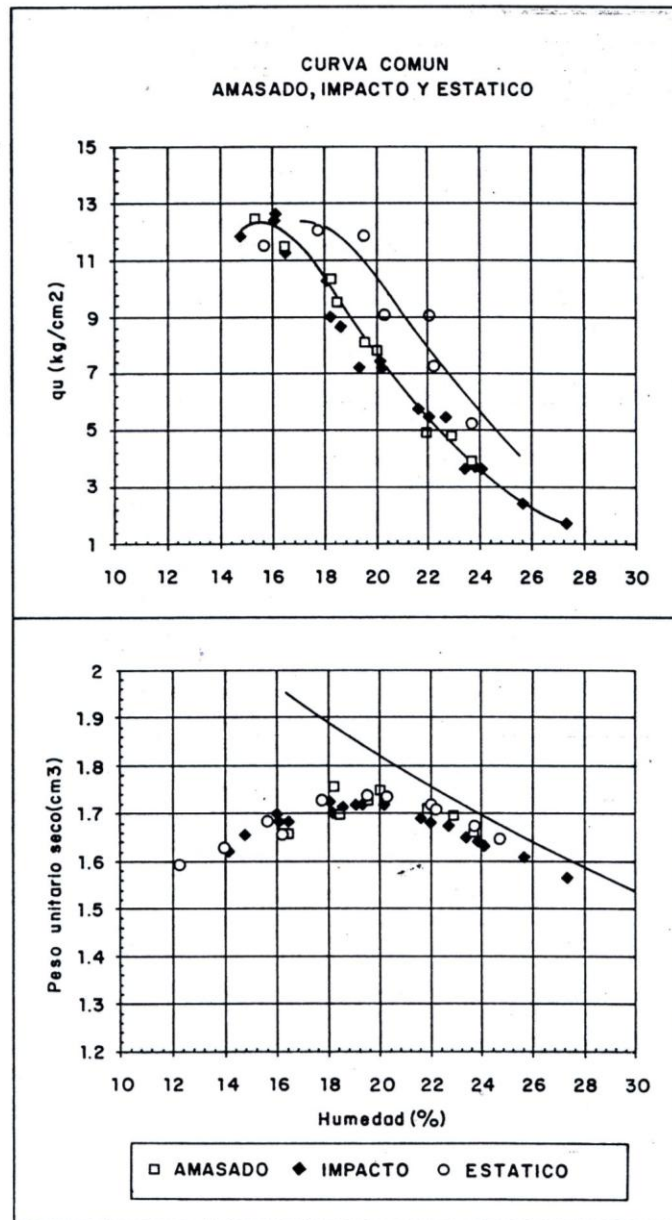


Figura 1 Curva común de compactación, obtenida por métodos de amasado, impacto y estático, y su relación con la compresión sin confinar.

variando desde valores del orden de 13 kg/cm² hasta 2 kg/cm². Este patrón de curvas obtenido previamente en otros tipos de suelos por varios investigadores, mantiene relación con el concepto de estructuras floculadas a humedades por debajo de la óptima, y de estructuras dispersas que prevalecen a humedades por encima de la óptima, lo cual fue confirmado en esta investigación, mediante la observación de la estructura en el microscopio electrónico.

De la Figura 1 puede también concluirse que las muestras compactadas con presión estática presentan resistencias a la compresión sin confinar 40% a 45% superiores a las compactadas por amasado e impacto. Las resistencias obtenidas por estos dos últimos métodos son prácticamente las mismas. Estos resultados respaldan la teoría planteada por otros investigadores, de que la estructura tiene un rol importante en las características de resistencia de suelos arcillosos, y de que el método de compactación estática es el que introduce menores deformaciones de corte; por tal razón, un suelo con tendencia a flocular mantiene la predominancia de dicha estructura, la cual está asociada a una mayor resistencia no drenada. Las resistencias similares obtenidas por amasado e impacto, sugieren que ambos métodos generan aproximadamente las mismas deformaciones de corte durante la compactación.

Ensayos de compresión triaxial UU

En las Figuras 2 al 4, seleccionadas para fines comparativos, se ilustran las curvas esfuerzo-deformación de tres muestras pertenecientes a diferentes humedades en la curva común de compactación, sometidas a compresión triaxial bajo presión confinante de 2 kg/cm², en su condición tal como fueron compactadas. Estas tres figuras muestran que independientemente del método de compactación, se nota un cambio progresivo en la forma de la curva, sugiriendo que el incremento de humedad cambia el comportamiento de más frágil a más plástico. Estos resultados son similares a los encontrados por Seed and Chan (1959), con la diferencia de que en el suelo por ellos investigado, las curvas esfuerzo-deformación en la rama húmeda, continúan aumentando en resistencia con deformaciones altas. En el suelo residual investigado, se observa que las muestras compactadas en la rama húmeda, la resistencia no drenada a altas deformaciones, presenta todavía disminuciones o se mantiene constante.

Las Figuras 5 y 6 muestran la comparación de curvas esfuerzo-deformación para muestras compactadas por amasado y por presión estática, una en la rama seca y otra en la rama húmeda. Puede verse que la muestra compactada en la rama seca por método estático, presenta una mayor resistencia a bajas deformaciones (5%), que la compactada por amasado, mientras que a altas deformaciones (20-25%), las resistencias aparentan ser similares. La muestra compactada en la rama húmeda por método estático, revela mayor resistencia no drenada que la compactada por amasado, tanto a bajas como a altas deformaciones. Estos resultados también pueden ser explicados en función de las deformaciones de corte introducidas por el método de compactación y de la estructura del suelo compactado.

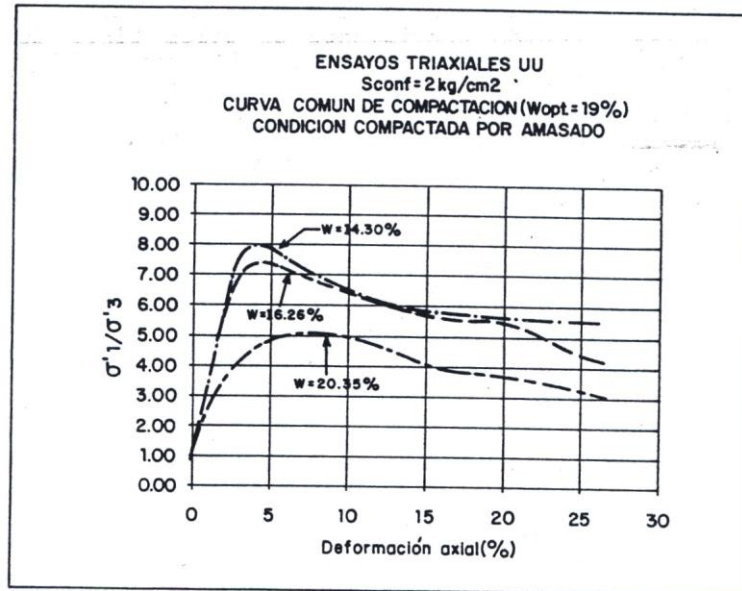


Figura 2 Influencia del contenido de humedad en las relaciones esfuerzo-deformación del suelo compactado por amasado.

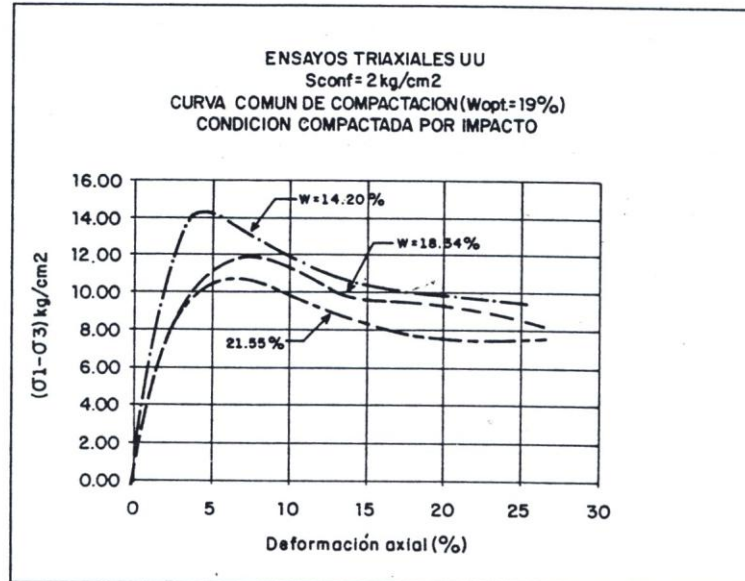


Figura 3 Influencia del contenido de humedad en las relaciones esfuerzo-deformación del suelo compactado por impacto.

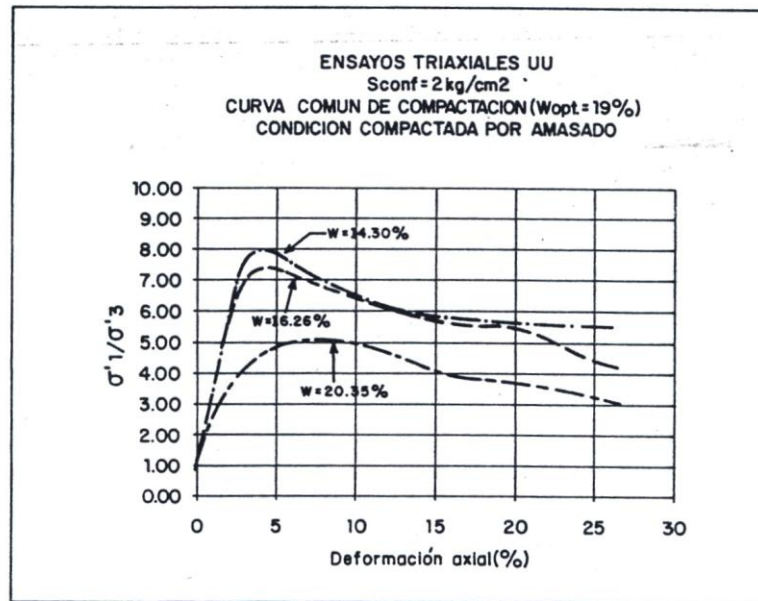


Figura 2 Influencia del contenido de humedad en las relaciones esfuerzo-deformación del suelo compactado por amasado.

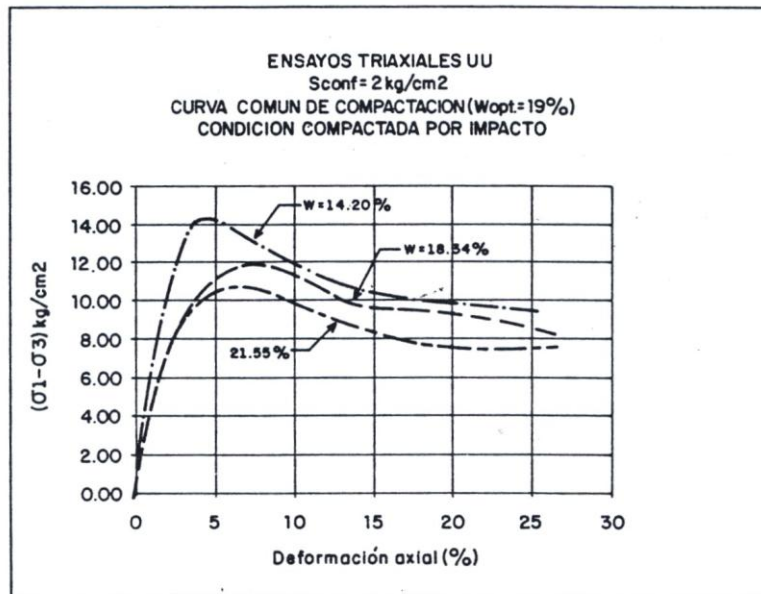


Figura 3 Influencia del contenido de humedad en las relaciones esfuerzo-deformación del suelo compactado por impacto.

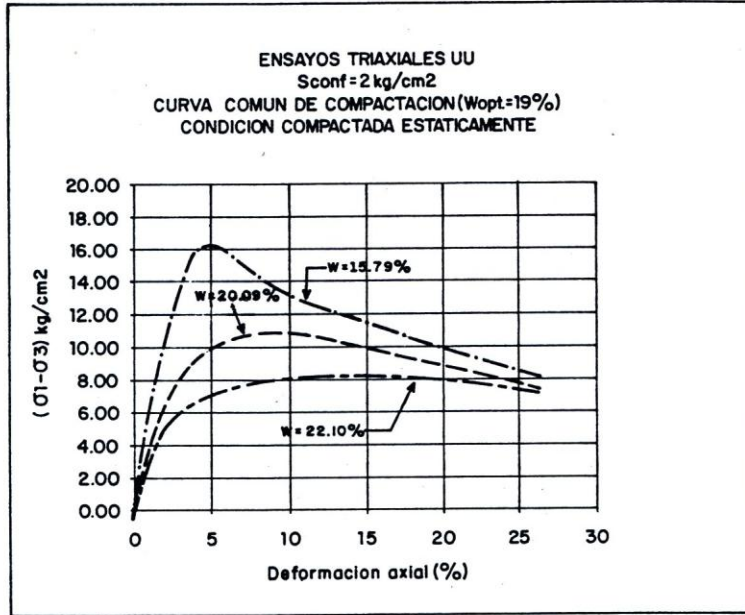


Figura 4 Influencia del contenido de humedad en las relaciones esfuerzo-deformación del suelo compactado estáticamente.

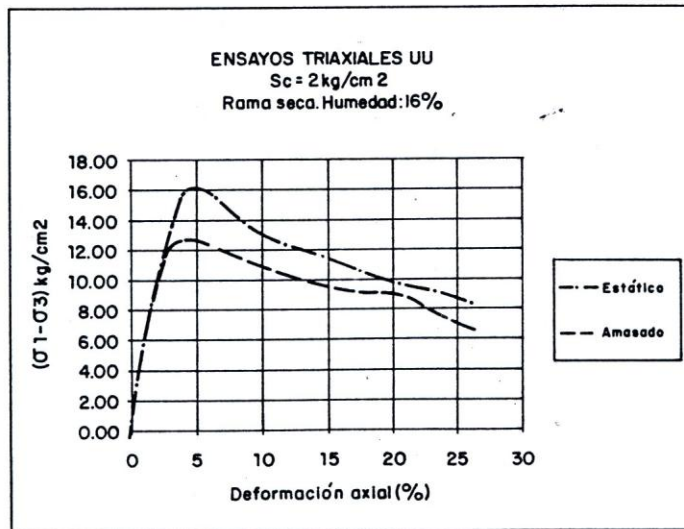


Figura 5 Influencia del método de compactación en la relación esfuerzo-deformación para muestras compactadas a la misma humedad en la rama seca.

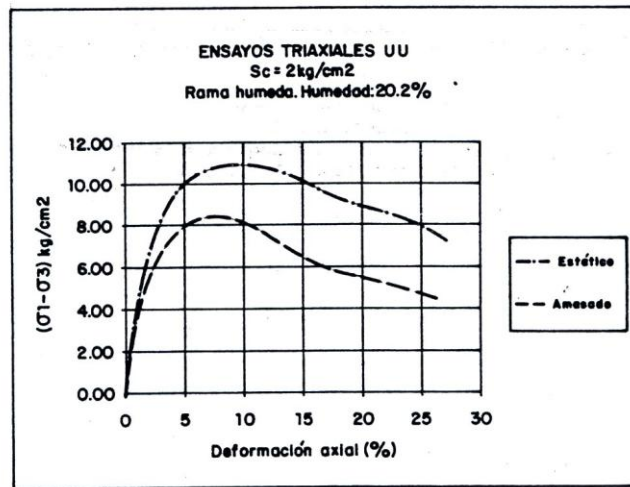


Figura 6 Influencia del método de compactación en la relación esfuerzo-deformación para muestras compactadas a la misma humedad en la rama húmeda.

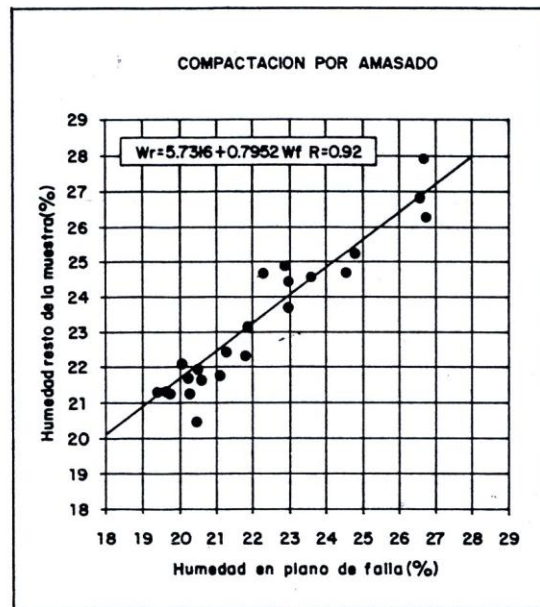


Figura 7 Relación entre humedad en plano de falla y humedad en el resto de la muestra, en ensayos de corte directo. Método amasado.

Ensayos de corte directo drenados

Un extensivo programa que comprendió 80 ensayos de corte directo lentos, fue realizado con el objetivo de obtener la resistencia al corte definida de acuerdo a los criterios de Hvorslev (1960). Todos los ensayos fueron ejecutados en muestras compactadas por los diferentes métodos, a la condición óptima de la curva común de compactación. Al terminar cada ensayo se determinó la humedad tanto de una sección del suelo en el plano de falla (w_f) como en el resto de la muestra. En general se obtuvieron menores humedades en el plano de falla, como puede verse en las Figuras 7 y 8.

La Figura 9 muestra los resultados de los ensayos de corte directo drenados ejecutados en muestras compactadas por amasado. Resultados similares fueron obtenidos para las probetas compactadas por impacto y estáticamente. La línea de ajuste inferior (ϕ'_s) corresponde a la condición del suelo normalmente consolidado. La línea intermedia que no pasa por cero, se debe al efecto aparente de preconsolidación que genera el método de compactación empleado, y la envolvente superior corresponde a muestras que fueron consolidadas a una presión de 14 kg/cm² y luego sometidas a corte a presiones inferiores.

Para todos los ensayos ejecutados se representó gráficamente la humedad a la falla (w_f) versus log. del esfuerzo de consolidación, w_f versus log. esfuerzo normal a la falla, y w_f versus log. esfuerzo de corte a la falla. Aceptando cierta dispersión, la evaluación de estos gráficos permitió visualizar el paralelismo entre dichas relaciones, y mediante el método de Terzaghi, descrito por Hvorslev (1960) y Gibson (1953), se pudo determinar para una misma humedad a la falla, el ángulo de fricción efectivo propuesto por Hvorslev.

En la Figura 9 se ha trazado la envolvente de Hvorslev para muestras de igual humedad a la falla. Los resultados obtenidos para las probetas compactadas con los diferentes métodos de compactación, fueron los siguientes:

Ángulo de fricción (Normalmente consolidado)

$$\phi'_s = 25-27^\circ$$

Ángulo de fricción efectivo: $\phi'_e = 17.8-19.9^\circ$

Coefficiente "k" de Hvorslev = 0.15-0.17

Cabe destacar que la dispersión de los datos, principalmente en los diagramas σ'_f -vs- w_f y τ'_f -vs- w_f , la cual también ha sido observada en resultados de otros autores (Simons, 1960), implica que las curvas de ajuste no tengan coeficientes de correlación aceptables, lo cual incide en la determinación precisa de los parámetros de Hvorslev. Aún con estas limitaciones, de acuerdo a los datos obtenidos, se puede concluir que dichos parámetros aparentan ser independientes del método de compactación, y en promedio pueden ser definidos como:

$$\phi'_e = 18.7^\circ$$

$$k = 0.16$$

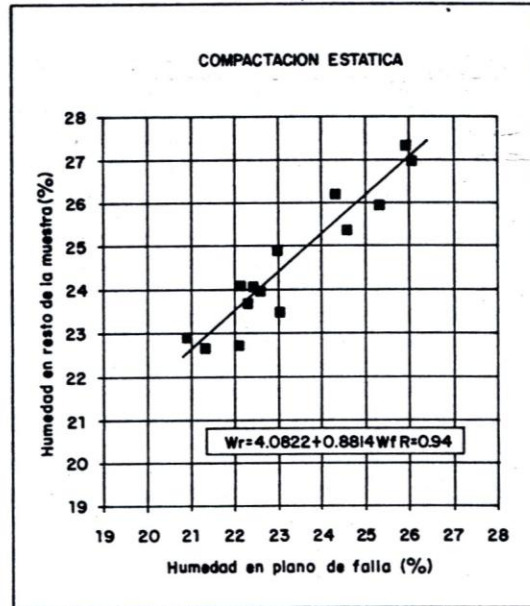


Figura 8 Relación entre humedad en plano de falla y humedad en el resto de la muestra, en ensayos de corte directo. Método estático.

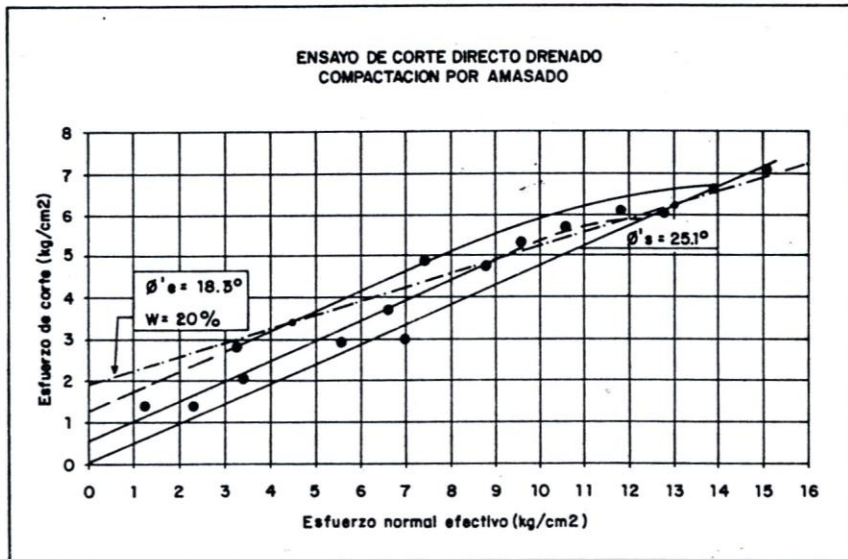


Figura 9

Siendo la cohesión efectiva (c'_e) de Hvorslev función de la presión equivalente de consolidación (σ'_e), ésta se puede calcular para el suelo investigado, de la relación:

$$c'_e = k \cdot \sigma'_e = 0.16 \cdot \sigma'_e$$

Adicionalmente a los ensayos de corte directo para determinación de resistencia pico, se realizaron una serie de ensayos para determinar la resistencia residual. Estos ensayos se ejecutaron en dos mitades de muestras perfectamente coincidentes, sometidas a corte hasta la máxima deformación que permitía el equipo. Los resultados revelaron, como era de esperarse, que el ángulo de fricción residual es independiente del método de compactación, con un valor único de $\phi_u = 17.8^\circ$. Este valor es, por lo tanto independiente de la estructura de la muestra. Es interesante mencionar el hecho de que el valor del ángulo de fricción residual, es bastante próximo (diferencias menores de 1°) al valor obtenido para el parámetro de fricción efectiva de Hvorslev. De comprobarse esta relación para otros tipos de suelos, la obtención de los parámetros de Hvorslev sería un procedimiento más sencillo y expedito, evitando la necesidad de realizar un gran número de ensayos y la determinación del contenido de humedad a la falla, lo cual es un procedimiento tedioso y sujeto a dispersión. Para ello se podría utilizar la modificación de la teoría de Hvorslev, propuesta por Tinoco (1981). A nuestro juicio, dicha modificación se considera interesante, puesto que la resistencia al corte se puede subdividir en dos componentes claramente diferenciables. La primera componente sería independiente de la estructura y correspondería al criterio de Coulomb de fricción sobre un sólido. La otra componente sería dependiente de la estructura y para fines prácticos puede ser denominada "cohesión efectiva", aun cuando físicamente esta componente no refleje dicho concepto específicamente.

Ensayos triaxiales secuenciales

En este tipo de ensayos, descritos por Tinoco (1975), la presión lateral se mantiene constante y se permite, mediante su drenaje, la consolidación anisotrópica de la muestra en etapas sucesivas. El primer ensayo se realizó del tipo UU, midiendo las presiones de poros en muestras previamente saturadas. Cuando se inició la rotura, se detuvo la aplicación de la carga vertical y se permitió drenaje hasta que la muestra se consolidara a una presión específica. Una vez disipadas las presiones de poros, se inició nuevamente un ensayo tipo CU, hasta una deformación tal que correspondiera al inicio del proceso de rotura. En este momento se detuvo nuevamente la aplicación de la carga vertical, se dejó que la muestra se consolidara a una presión deseada, permitiendo su drenaje, y se inició la última etapa con otro ensayo consolidado sin drenar con medición de las presiones de poros.

Los ensayos realizados para las muestras compactadas a humedad óptima por los tres métodos de compactación, interpretados en términos de trayectorias de esfuerzos efectivos en un plano de 45° (Lambe y Whitman 1972), y de acuerdo a la teoría de Hvorslev modificada por Tinoco (1981), se presentan en las Figuras 10 y 11. Puede observarse que en ambos casos, la resistencia al corte efectiva aparenta ser independiente del método de compactación utilizado. Nótese además en la Figura 11, que la relación σ'_f/σ'_e resultó en todos los ensayos menor de 1, lo cual es indicativo de

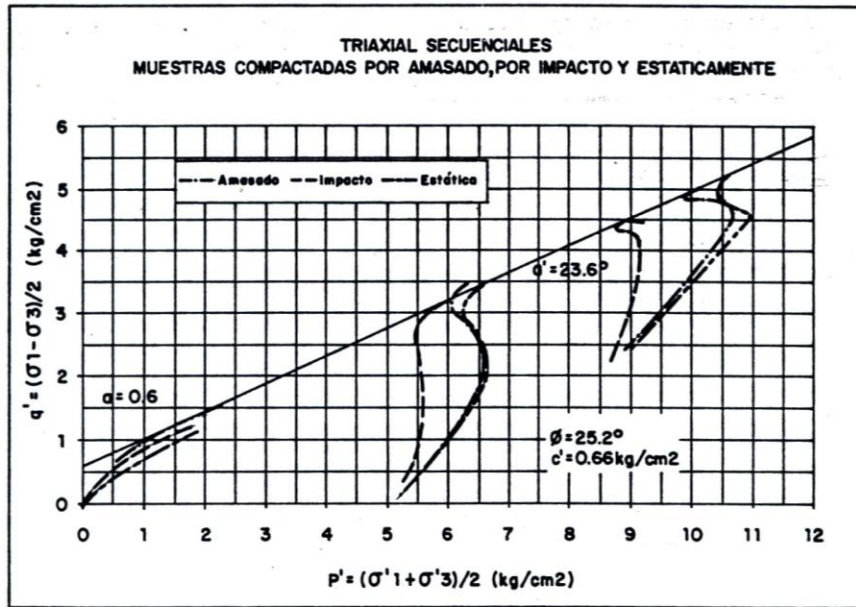


Figura 10 Trayectoria de esfuerzos efectivos para muestras compactadas por amasado, impacto y estáticamente.

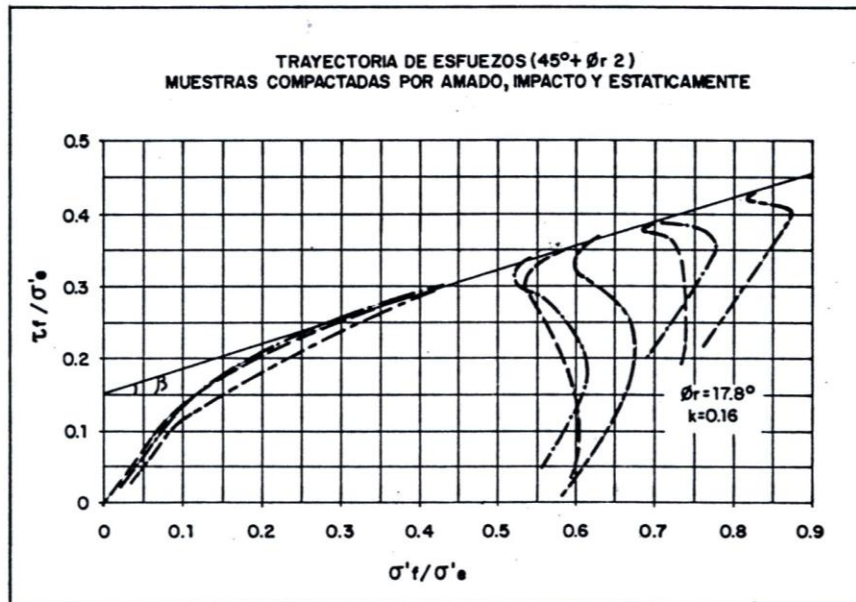


Figura 11 Trayectoria de esfuerzos en un plano que forma un ángulo de $45^\circ + \phi'_r/2$ con el esfuerzo principal menor.

que la aparente presión de preconsolidación causada por la compactación, es superior al esfuerzo normal actuante en el plano de falla. En otras palabras, el suelo residual investigado compactado se comportó como un suelo preconsolidado a las presiones utilizadas en los ensayos secuenciales.

CONCLUSIONES FINALES

1. En cuanto a la resistencia no drenada, el comportamiento del suelo residual investigado puede ser interpretado en función de la estructura de las arcillas que lo constituyen. Las mayores resistencias no drenadas en la rama seca, están asociadas a estructuras de tipo floculado, y las menores resistencias en la rama húmeda están asociadas a estructuras con tendencia a la dispersión.
2. La estructura del suelo compactado tiene un marcado efecto en sus características de esfuerzo-deformación. Un incremento en la humedad de compactación, cambia su comportamiento de más frágil a más plástico. En tal sentido las muestras con estructura floculada tienden a presentar una curva más abrupta, desarrollando su máxima resistencia a bajas deformaciones. A medida que aumenta la humedad se nota un cambio en la forma de la curva esfuerzo-deformación, sin embargo, a diferencia de otros suelos reportados en la literatura, en los cuales dicha curva se caracteriza por una tendencia a ganar resistencia con la deformación, el suelo investigado tiende a conservar su comportamiento de alcanzar la máxima resistencia a bajas deformaciones pero con curvas más suaves. La forma adquirida por la curva a mayores humedades, presenta poca diferencia en resistencia bajas y altas deformaciones. La diferencia de comportamiento del suelo objeto de estudio, puede ser explicada por la tendencia a la floculación de las partículas de arcilla y posiblemente por la presencia de partículas de limo.
3. El método de compactación utilizado tuvo una influencia decisiva en la resistencia no drenada. La evaluación de resultados tanto los publicados en este artículo como otros provenientes de ensayos CBR y de otros ensayos triaxiales, permitieron ordenar los métodos de compactación, de mayor a menor resistencia, en: estático, impacto y amasado. Estos resultados confirman que el método estático introduce menores deformaciones de corte en el suelo, por lo cual éste tiende a retener su estructura esencialmente floculada. Por otra parte el método por amasado introdujo las mayores deformaciones de corte y como consecuencia una estructura con tendencia a la dispersión.
4. Los resultados de ensayos de corte directo drenados, permiten afirmar que la resistencia al corte de las muestras compactadas, representada tanto por las teorías convencionales para determinación del ángulo de fricción efectivo y la cohesión efectiva, como por la teoría de Hvorslev, es independiente del método de compactación.

5. Los resultados de los ensayos triaxiales secuenciales, interpretados en términos de trayectorias de esfuerzos efectivos en un plano de 45° con los esfuerzos principales, revelaron una envolvente prácticamente común para todas las muestras, independientemente del método de compactación. Asimismo, los resultados de dichos ensayos, interpretados de acuerdo a la teoría de Hvorslev (1960), adaptada por Tinoco (1981), revelan independencia de la resistencia al corte efectiva con respecto al método de compactación.
6. La proximidad de los valores en los parámetros de Hvorslev, obtenidos por el método de Terzaghi y por la modificación de la teoría de Hvorslev propuesta por Tinoco (1981), sugiere que, de comprobarse esta proximidad para otros tipos de suelos, este último método sería un procedimiento más sencillo y expedito para la obtención práctica de dichos parámetros.

REFERENCIAS

- Gibson, R. (1953), "Experimental determination of the true cohesion and true angle of internal friction in clays." Proc. Int. Conf. on Proc. 3rd. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich. Vol. 1. pp. 126-130.
- Hvorslev, M. J. (1960), "Physical components of the shear strength of saturated clays." Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado. ASCE. pp. 169-273.
- Lambe, W. (1958), "The structure of Compacted Clay" and "The engineering behavior of compacted clay." Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proceedings ASCE. Mayo. pp. 1-34.
- Lambe, W. (1960), "A mechanistic picture of shear strength in clay". Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado. ASCE. pp. 555-580.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1972), Mecánica de Suelos. (Trad. J.A. Jiménez Salas y J.M. Rodríguez). Editorial Limusa-Wiley S.A. México.
- Ortas, J. (1994), "Influencia de las condiciones de compactación en el comportamiento de un suelo residual". Tesis de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. p. 254.
- Rico, A. y Del Castillo, H. (1974), La Ingeniería de Suelos en las vías terrestres. Vol. 1. Editorial Limusa. S.A. Mexico. p. 455.
- Seed, H.B. and Chan, C. K. (1957), "Thixotropic characteristics of compacted clays." Proc. ASCE. Vol. 83. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, SM-4. Paper 1427. pp. 1427-1 to 25. November.
- Seed, H. B. and Chan, C. K. (1959), "Structure and strength characteristics of compacted clays." ASCE Proc. paper 2216. October.

Seed, H., Mitchell, J., and Chan, C. (1960), "The strength of compacted cohesive soils." Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado. ASCE. pp. 877-964.

Simons, N. (1960), "Comprehensive investigation of the shear strength of an undisturbed Drammen clay." Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado. ASCE. pp. 727-745.

Simons, N. (1960), "The effect of overconsolidation on the shear strength characteristics of an undisturbed Oslo clay." Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder, Colorado. ASCE. pp. 747-763.

Tinoco, F. H. (1975), "Comportamiento de una arcilla limosa sometida a cargas en secuencia." V Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Tomo I. pp. 238-246.

Tinoco, F. H. (1981), "Residual strength and Hvorslev parameters of clays." Proc. 10th. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm. pp. 1-9

Wilson, S. D. (1950), "Small soil compaction apparatus duplicates field test results closely." Engineering News Records. 145. No. 18. pp. 34-36. November.