

SISTEMATIZACIÓN DE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN EN ARCILLAS INORGÁNICAS Y DE LOS CÁLCULOS ASOCIADOS.

Cordero Arias Josbel Andreina, Sánchez Morles Mila E.
Email: josbelcordero@ucla.edu.ve - msanchez@ucla.edu.ve

RESUMEN

El trabajo presenta la sistematización del ensayo de consolidación, instalándole al consolidómetro el transductor de longitudes y el dispositivo de salida digital de la máquina de corte directo, todos existentes en el Laboratorio de Suelos del Decanato de Ingeniería Civil de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. La adaptación se realizó mediante una interfaz entre el computador y dicho dispositivo para permitir la lectura automatizada de deformaciones verticales en muestras de suelos arcillosos sometidas a variaciones de cargas. Estos datos son procesados posteriormente mediante un software elaborado en esta investigación que registra los valores y realiza los cálculos inherentes al proceso de consolidación.

El software y la adaptación descrita, reducen los errores de apreciación en la toma de datos, disminuyen la subjetividad del procedimiento manual para determinar los parámetros e índices asociados del ensayo de consolidación al aplicar funciones y procesos matemáticos. Adicionalmente agilizan la obtención de los resultados.

Palabras claves: arcillas inorgánicas, ensayo de consolidación, interfaz, asentamiento.

ABSTRACT

The paper presents the Systematization of the consolidation test, installing to the consolidometer the linear strain transducer and the digital output device of the direct shear machine, all available in the Soil Laboratory of the School of Civil Engineering, University Centroccidental Lisandro Alvarado. The adaptation was done through an interface between the computer and the device, to allow automated reading of vertical strain in clay soil samples subjected to load variations. These data are further processed by a software developed in this study that records the values and perform calculations related to the consolidation process.

The software and the adaptation described, reduce errors of assessment data collection, lessen the subjectivity of the manual procedure to determine the parameters and indices associated with the consolidation test by applying mathematical functions and processes. Additionally, streamline the collection of results.

Keywords: inorganic clay, consolidation testing, interface, settlement.

INTRODUCCIÓN

El proceso de reducción de volumen de un suelo fino saturado por efecto de la aplicación de una carga constante es lo que se conoce como Consolidación, es considerada como una deformación plástica en función del tiempo y del exceso de presión de poros.

La importancia de este concepto radica en que las deformaciones de la mayoría de los suelos bajo cargas de diferentes magnitudes son mucho mayores que la de otros materiales estructurales, por esto se recurre a la reproducción del

fenómeno en el laboratorio mediante equipos conocidos como consolidómetros o edómetros.

El objetivo del ensayo es simular la compresión confinada de los suelos bajo cargas externas, con el fin de determinar los parámetros que regulan el proceso (C_r , C_c , C_v y σ_p), los cuales permiten calcular la magnitud de los asentamientos y estimar el tiempo de ocurrencia.

Para la obtención de los parámetros reguladores del proceso se requiere de una serie de procedimientos gráficos,

cuyo tratamiento manual es laborioso y puede llegar a inducir importantes errores de apreciación en los resultados. Con el fin de mejorar el procesamiento de los datos de un ensayo de consolidación y de optimizar la obtención y confiabilidad de los resultados, se desarrolló el *Programa para el Asentamiento por Consolidación*, PAC, que incluye tres fases, la primera es la interfaz que transforma las señales digitales emitidas por el transductor de longitudes en datos de deformación. La segunda, consiste en la modelación numérica de la curva de compresibilidad y el procesamiento matemático para el cálculo de diversos índices asociados al ensayo de consolidación. La última etapa corresponde a la presentación ordenada de los resultados.

Actualmente en el mercado existe una considerable variedad de dispositivos de salida, capaces de leer varios tipos de señales eléctricas mediante un transductor de longitudes y almacenar datos en su memoria interna, que finalmente es transferida al computador, lo cual facilita la toma de datos. La adquisición de este tipo de dispositivo por parte de la Universidad es cada vez más complicada, tanto en términos presupuestarios, por los costos, como en términos burocráticos, por lo complejo de la tramitación. Por ello, se planteó el aprovechamiento de un módulo digital existente en el Laboratorio de Suelos, que forma parte de la máquina de corte directo, para acoplarlo al consolidómetro y utilizarlo no sólo en los ensayos de corte directo, sino también en los ensayos de consolidación.

El software PAC, permitió sistematizar el ensayo de consolidación, empleando el dispositivo de salida digital de la máquina de corte directo existente en el Laboratorio. Adicionalmente se mejoró el proceso de captación de datos y se sustituyó el tratamiento manual de los procedimientos gráficos, por su procesamiento matemático, lo cual garantiza una mayor exactitud en los resultados.

METODOLOGÍA

La reducción de volumen que sufre un suelo arcilloso saturado en campo por efecto de la aplicación de una sobrecarga permanente se representa experimentalmente a través del ensayo de consolidación practicado a una muestra inalterada.

El primero en diseñar un equipo para representar el proceso de consolidación fue Frontard en 1910 (Nagarat y Miura, 2001), posteriormente en 1921 Karl von Terzaghi diseñó otro para estudiar la retracción del suelo, al que llamó edómetro (Terzaghi, 1923). Este último aparato fue perfeccionado por Arthur Casagrande (Casagrande, 1932), y sus principios básicos se mantienen en los equipos actuales, donde las mejoras han estado relacionadas fundamentalmente con la incorporación de nuevas tecnologías.

El ensayo de consolidación tiene carácter universal y está incluido en diferentes normas a nivel mundial (ASTM D2435 y UNE 103-405-94).

Los elementos requeridos para la automatización del ensayo de consolidación fueron los siguientes:

- Consolidómetro
- Dispositivo de salida digital (datalogger)

- Transductor de longitudes
- Computador con puerto serial
- Software que capta las señales de deformación y realiza los cálculos asociados al proceso de consolidación de una muestra de suelo arcilloso (PAC).

DESARROLLO DEL SOFTWARE

El Programa para el Asentamiento por Consolidación, está elaborado con el uso del lenguaje Visual Basic. Este software incluye tres fases, la primera es la interfaz que transforma las señales digitales emitidas por el transductor de longitudes en datos de deformación.

La segunda consiste en la modelación numérica de la curva de compresibilidad y el procesamiento matemático para el cálculo de diversos índices asociados al ensayo de consolidación.

La última etapa corresponde a la presentación ordenada de los resultados.

Fase 1: Interfaz

La interfaz se elaboró mediante el control de comunicaciones seriales de Visual Basic, denominado MsComm, el cual permite leer y enviar datos a dispositivos de comunicaciones seriales, interactuando con el puerto serial y notificando cuándo tiene lugar un evento o cuándo llega un carácter (deformaciones). Dentro de sus propiedades están establecer y devolver el estado del puerto de comunicaciones, abrir y cerrar dicho puerto, devolver y quitar caracteres del búfer de recepción y escribir cadenas de caracteres en el búfer de transmisión. Con este comando, el computador capta la señal que el *datalogger* envía a través del puerto serial.

La señal original percibida por la interfaz se refiere a la deformación sufrida por el transductor medida en milímetros y el tiempo en segundos transcurrido a lo largo de todo el proceso de deformación.

Por requisitos del ensayo, se decidió depurar la señal trabajando solo con las deformaciones y controlando el tiempo real de ocurrencia de cada lectura con un componente adicional de Visual Basic denominado Timer. Dicho componente permitió captar el tiempo del evento con un intervalo preestablecido, este tiempo de 6 segundos se fijó en función de las curvas de consolidación de cada esfuerzo, las cuales requieren que el primer intervalo sea de 0,1 minutos; ajustándose de esta manera a la escala logarítmica requeridas en las curvas de consolidación.

Debido a que el control que establece el desarrollo de la interfaz debe trabajar con la misma velocidad de transmisión de la señal captada por el *datalogger*, ésta fue fijada en 9600 baudios por segundo, dado que con este valor se obtuvo la recepción en línea adecuada.

Con la recepción y depuración de la señal, se logró el almacenamiento de las lecturas de deformaciones y el tiempo real de ocurrencia.

Fase 2: Modelación matemática del proceso

En un ensayo de consolidación se generan dos tipos de curva, las llamadas curvas de consolidación que reflejan las

deformaciones verticales a lo largo del tiempo en que son aplicados los diferentes incrementos de esfuerzos; y la curva de compresibilidad que describe los cambios en la relación de vacíos asociados a las variaciones de esfuerzos en las etapas de carga y descarga.

Según Sancio (1985, 1986) el mejor mecanismo para la representación de las curvas que se generan a partir de datos experimentales obtenidos en el ensayo de consolidación, son una secuencia de plantillas cúbicas conocidas como función Spline Cúbico.

El primero en formular este tipo de función fue Shoenberg en 1946. La función spline cúbico consiste en un conjunto de aproximaciones polinómicas entre parejas sucesivas de nodos, donde cada polinomio interpolante es de grado tres. Un polinomio cúbico general involucra cuatro parámetros; por tanto tiene suficiente flexibilidad en el procedimiento para garantizar que la función interpolante es continuamente diferenciable en el intervalo y que la segunda derivada es continua. Esta continuidad hasta su segunda derivada dota a la función de esa suavidad requerida para su aplicación en problemas reales.

En consecuencia se consideró la aplicación del spline cúbico en escala semilogarítmica como método numérico para la simulación de las curvas que describen el proceso del ensayo de consolidación.

Los tramos correspondientes a carga y descarga en la curva de compresibilidad se construyeron empleando la misma ecuación polinómica. No obstante, la utilización de esta ecuación en el tramo de descarga requirió un reordenamiento en forma ascendente para poder aplicar el concepto de spline cúbico (Burden y Faires, 1985), que impone el trabajo con pares sucesivos donde $X_0 < X_1 < \dots < X_n$.

Ya teniendo desarrollado el proceso de captación de datos y modeladas matemáticamente las diferentes curvas, se aplican procedimientos de geometría analítica para simular los métodos gráficos utilizados en los cálculos, los que conjuntamente con algoritmos y operaciones algebraicas completan el análisis del asentamiento total por consolidación en arcillas inorgánicas no sensitivas.

Las propiedades más importantes que se obtienen de un ensayo de consolidación son:

- El coeficiente de consolidación (C_v), relacionado con la velocidad de compresión bajo un incremento de carga y este es utilizado en la predicción del tiempo que ha de transcurrir para la ocurrencia de un asentamiento determinado.
- Los índices de compresibilidad (C_r y C_c), que indican la compresibilidad del espécimen y son utilizados en el cálculo del asentamiento total por consolidación.

El coeficiente C_v se obtiene a partir de las curvas de consolidación, y para su determinación es necesario estimar el tiempo correspondiente al 50% de consolidación (t_{50}), utilizando el método logarítmico (Lambe y Whitman, 1984). En este sentido, se requiere trazar las líneas que correspondan al 0, 50 y 100% teórico de consolidación.

En el primer caso, se ubica el tramo que contiene la abscisa igual a cuatro veces el valor del origen y se calcula su ordenada mediante la ecuación del spline. De la diferencia entre

esta ordenada y la correspondiente al origen, se obtendrá un valor que se proyecta sobre la ordenada del origen para trazar una horizontal que define la línea del 0% teórico de consolidación.

En cuanto a la determinación de la línea del 100% teórico de consolidación, la ubicación del tramo central por el que debe ser trazada una de las tangentes se realiza calculando la pendiente de los tramos mediante la primera derivada de la función spline y seleccionando el de mayor pendiente negativa. La ecuación de esta primera tangente es la recta que pasa por los puntos extremos de ese tramo. Por otra parte, la ecuación de la recta tangente a la parte asintótica del tramo final de la curva se determina aplicando la ecuación punto-punto entre el último punto y el punto medio de este tramo. Finalmente, igualando las ecuaciones de las dos tangentes se obtiene el punto de intersección por donde pasa la horizontal del 100%.

El valor intermedio entre 0 y 100% define la línea del 50% teórico de consolidación. El cálculo del t_{50} se logra dividiendo cada tramo de la curva de consolidación en 100 partes iguales, y realizando un tanteo diferencial se compara cada ordenada con la de la horizontal del 50%, hasta conseguir un valor menor, con el que se promedia la abscisa de este último punto con la del punto anterior, para aproximar el valor del t_{50} .

Este parámetro permite calcular C_v aplicando la solución aproximada a la ecuación de Terzaghi (Taylor, 1948 y Leonards, 1962). Cada incremento de carga aplicado tiene asociado un valor de t_{50} y C_v .

Los índices C_r y C_c provienen de la curva de compresibilidad, sus cálculos implica una serie de operaciones geométricas sobre los spline con los que se ha construido la curva. El primer paso es estimar el Esfuerzo de Preconsolidación, modelando matemáticamente el procedimiento gráfico de Casagrande (1936). Para ello, se comienza determinando la curvatura de cada tramo de la curva, calculando su primera y segunda derivada, luego aplicando el teorema de los valores extremos se comparan todas las curvaturas hasta encontrar el valor máximo y el punto donde ocurre. La derivada de la función spline evaluada en ese punto es la pendiente de la recta tangente y aplicando la ecuación punto-pendiente se llega a su expresión. El ángulo que se forma entre dicha tangente y una horizontal que pasa por el punto de máxima curvatura, se calcula como la tangente inversa evaluada entre este punto y uno posterior que pertenece a la misma recta tangente. La bisectriz se obtiene aplicando la ecuación punto-pendiente, con pendiente igual a la mitad del ángulo que se acaba de determinar y el punto de máxima curvatura.

Por otra parte, la formulación que define al tramo virgen proviene de la ecuación punto-punto de una recta con los puntos medio y último del tramo final de la curva de compresibilidad. Finalmente, se igualan las ecuaciones del tramo virgen y de la bisectriz para definir el punto de intersección cuya ordenada representa el valor del esfuerzo de preconsolidación.

Ya teniendo el esfuerzo de preconsolidación se determina la relación de sobreconsolidación (R_s), para identificar

la condición de la arcilla: normalmente consolidada (NC) o preconsolidada (PC).

Schmertmann (1955) propone una corrección de la curva de compresibilidad de laboratorio, mediante un procedimiento gráfico para calcular los índices asociados de acuerdo con el tipo de arcilla. En arcillas PC, se pueden estimar los índices de recompresión (C_r) y compresión (C_c).

Sánchez (1992) demostró que los parámetros geométricos de la curva de compresibilidad pueden ser simulados matemáticamente con excelentes resultados.

C_r es aproximada como la derivada de la función spline en el extremo inicial de la curva y aplicando la ecuación punto pendiente se determina la expresión del tramo de recompresión. Al sustituir en ella el valor del esfuerzo de preconsolidación se obtiene uno de los puntos necesarios para calcular el C_c . El otro punto es el resultado de la ecuación del tramo virgen evaluada con el 42% de la relación de vacíos inicial (Schmertmann, 1955). La pendiente que definen estos dos puntos es C_c .

En arcillas NC solo tiene sentido el cálculo de C_r , dado que la pendiente del tramo de recompresión es nula por definición.

El último paso de la estrategia computacional es el cálculo de asentamiento, que se logra aplicando la formulación teórica empleando operaciones algebraicas básicas.

Fase 3: Presentación ordenada de la información

Tanto los resultados numéricos como las curvas son presentados utilizando un enlace del software con Microsoft Excel, que proporciona los requerimientos técnicos y visuales inherentes a las exigencias de la sistematización del ensayo y de los procedimientos de cálculo.

Comprobación del Software

Una vez completado el diseño del software, se procedió a su verificación, para lo cual se realizaron 5 ensayos, cuyos datos y resultados fueron procesados con el software.

Los ensayos de consolidación se realizaron con el dispositivo de salida digital para la validación del equipo, a fin de probar el comportamiento del software PAC con la toma automatizada de las lecturas. Se usaron muestras de suelo arcilloso, previamente caracterizadas.

Resultados

Con la recepción y depuración de la señal, se logró almacenar los registros necesarios para el desarrollo automatizado de la toma de lecturas de deformaciones y el tiempo real de ocurrencia, entrando esto en funcionamiento a través del botón "Lecturas OnLine" (figura N° 1). Mediante este botón conmutador se activa el envío de la señal proveniente del datalogger y así las lecturas son vistas en pantalla y una vez pulsado dicho botón, el mismo sirve para detener la recepción de la señal y su nomenclatura cambia automáticamente a "Parar Lecturas" (figura N° 1). Procedimiento que se hace al momento de un cambio en el incremento o decremento de esfuerzos.



Figura N° 1. Botón conmutador

Fuente: Programa "PAC"

El programa presenta la opción de introducir los valores también de forma manual, independientemente de la manera de adquisición de los datos, estos se almacenan en celdas tal como se muestra en la figura N° 2.

Numero:	Esfuerzo (Kg/Cm2): 0,25				Lecturas OnLine
Fecha	Hora	Minutos	Segundos	Lect.	
20/02/98	10	50	0	14,181	
20/02/98	10	50	6	14,181	
20/02/98	10	50	10	14,18	
20/02/98	10	50	15	14,178	
20/02/98	10	50	30	14,176	

Figura N° 2. Presentación de datos

Fuente: Programa "PAC"

Al finalizar el ensayo, se detiene la toma de datos y se oprime el botón "Calcular" para que el software los procese y almacene los resultados.

Para cada incremento de carga genera la curva de consolidación tal como se muestra en la figura N° 3.

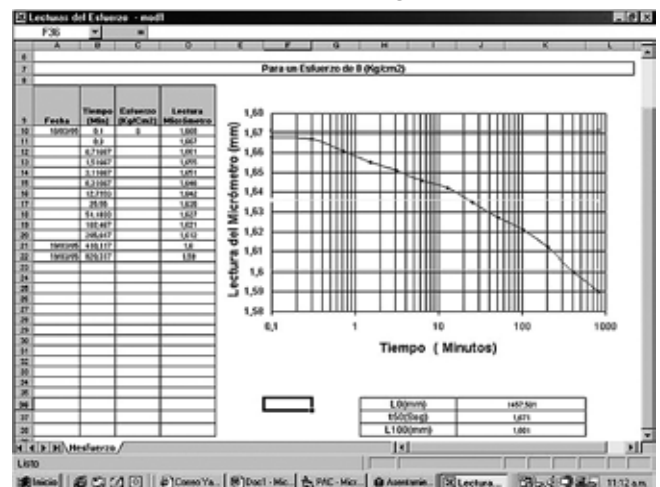


Figura N° 3. Presentación de la curva de consolidación por incremento de carga

Fuente: Programa "PAC"

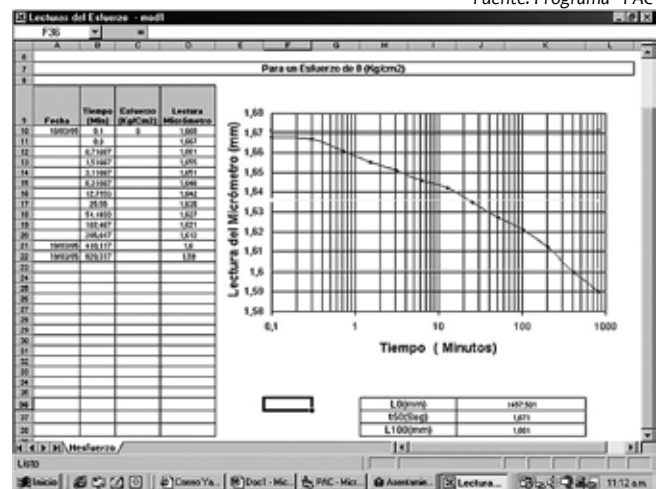


Figura N° 4. Presentación de la curva de compresibilidad del ensayo

Fuente: Programa "PAC"

En la salida gráfica del software para la curva de compresibilidad se distinguen los tramos de recompresión, virgen y descarga. (Ver figura N° 4)

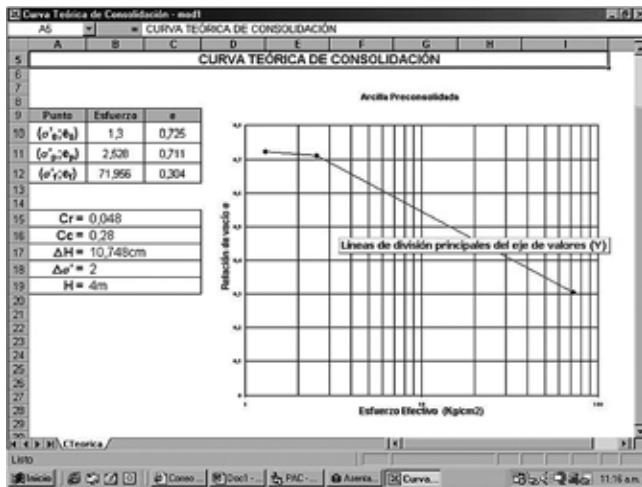


Figura N° 5. Presentación de la curva teórica de campo y cálculo del asentamiento total

Fuente: Programa "PAC"

La figura N° 5 presenta la curva teórica de campo, los índices asociados y el resultado del asentamiento total promedio esperado para un espesor de estrato determinado.

Conclusiones

Se logró la sistematización de la toma de datos a través de la interfaz establecida entre el computador y el dispositivo de salida, captando las deformaciones y el tiempo en que ocurren. El correcto funcionamiento se demostró con la realización de 5 ensayos de consolidación tanto de manera manual como sistematizada.

Una de las grandes ventajas de automatizar la toma de datos es que prácticamente elimina los errores de apreciación en que puede incurrir el operador al realizar o transcribir las lecturas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM INTERNATIONAL. "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading". D2435. USA: ASTM, 2004.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN AENOR NORMA ESPAÑOLA. "Ensayo de Consolidación Unidimensional de un suelo en Edómetro". UNE 103-405-94. Madrid: AENOR, 1994.

BURDEN, R. L. y FAIRES J. D. Análisis Numérico. Mexico D. F.: Grupo editorial Iberoamericana, 1985. 721 p.

CASAGRANDE, A. "The structure of clay and its importance in foundation engineering". Journal of Boston Society of Civil Engineers. 1932, Vol. 19, 4, p. 169-209.

Los ensayos de consolidación requieren una constante atención por parte del operador sobre la toma de lecturas en los tiempos establecidos por la norma. En este sentido, el programa PAC proporciona al usuario la comodidad de la toma automática y continua de los datos sin requerir su atención permanente para el registro.

El uso de spline cúbico en escala semilogarítmica como método de interpolación de las curvas asociadas al ensayo de consolidación resulta una buena aproximación, según se evidencia en los resultados obtenidos en este trabajo. Por consiguiente, las operaciones matemáticas que se realizan a partir de dicha función para simular el procedimiento geométrico, arrojan resultados menos subjetivos que los logrados cuando el proceso es realizado manualmente.

En arcillas cuya curva de compresibilidad no revela en forma clara su historia de carga, los errores asociados a la determinación manual de los valores obtenidos gráficamente pueden llegar a ser muy grandes y, por ende, afectar significativamente el cálculo de los parámetros de interés en el proceso de consolidación. El programa PAC resulta particularmente útil en el análisis de este tipo de arcillas, dado que se reducen en alto grado los errores inducidos por la apreciación personal.

Independientemente del tipo de arcilla que se esté analizando, el programa PAC constituye una herramienta fácil de usar y eficiente, ya que agiliza la obtención de resultados de utilidad en el análisis del proceso de consolidación. Otra importante contribución del programa PAC radica en que calcula adecuadamente las propiedades más relevantes que se obtienen de un ensayo de consolidación:

- Coeficiente de consolidación (C_v), coeficiente de permeabilidad (k) y coeficiente de compresibilidad (α_v), necesarios para la determinación del tiempo en el cual se espera que ocurra el asentamiento y la velocidad del mismo.
- El esfuerzo de preconsolidación (σ_p), el índice de compresibilidad (C_c) y el índice de recompresión (C_r) dependiendo del tipo de arcilla, que son indispensables en el cálculo del asentamiento total por consolidación.

CASAGRANDE, A. "The Determination of Preconsolidation Load and its Practical Significance", Proceeding of Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1936, Cambridge.

LAMBE, T. W. y WHITMAN R. V. Mecánica de Suelos. México: Limusa, 1984. 586 p.

LEONARDS, G. A. Foundation Engineering. New York (USA): Mc Graw Hill, 1962. 1136 p.

SANCHEZ, M. Cálculo computarizado de la curva de consolidación de una arcilla. Proyecto especial para obtener el grado de especialista en Geotecnia. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela, 1993.

SANCIO R. T. Características Geotécnicas del área compren-

dida entre Punta Cardón y Punto Fijo, Península de Paraguaná, estado Falcón. Punta Cardón (Venezuela): Informe técnico realizado para Maraven S. A. 1985.

SANCIO R. T. "Typical Curves in Geomechanics", Proceedings of Conference on theoretical and Applied Mechanics. 1986, Volume II, Columbia, South Carolina.

SCHOENBERG, I. J. "Contributions to the problem of ap-

proximation of equidistant data by analytic functions". Quarterly of Applied Mathematics. 1946, 4. Part A. p. 45-99.

SCHMERTMANN, J. M. "The undisturbed consolidation of clay". Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1955, 120, p. 1201.

TAYLOR, D. W. Fundamentals of Soils Mechanics. Londres: Chapman & Hall, 1948. 194 p.