

DESARROLLO INSTRUMENTAL Y MEDICION DE LA RESISTENCIA A LA ROTURA DE COSTRAS DE SUELO

ANA M. LANDINI¹, LUCILA I. BOTTINI¹ y MARIA C. FABRIZIO²

Recibido: 21/12/93

Aceptado: 11/10/94

RESUMEN

El estudio de la medición de la resistencia a la rotura de las costras de suelo es útil para evaluar los efectos de las mismas sobre la infiltración y la emergencia de las plántulas. Luego de una laboriosa revisión bibliográfica sobre los procedimientos experimentales desarrollados para medirla a partir de 1953, se reprodujo en laboratorio un método que imita la emergencia de las plántulas. Se ensayó no sólo en costras de suelo sino también en materiales isotropos, tomados como testigos, que permitieron evaluar y distinguir los errores experimentales intrínsecos del método, de la dispersión originada por la naturaleza del material. Se logró fundamentar y justificar desde el punto de vista físico el método de medición mediante un análisis exhaustivo del fenómeno de rotura en materiales homogéneos isotropos y anisotropos. Por razones de extensión, la versión completa del mismo consta en un Apéndice en castellano, a disposición de los investigadores en la Biblioteca de esta Facultad. Este artículo describe también en forma detallada la construcción y manejo del equipo de medición. Este método de medición fue satisfactorio en materiales homogéneos e isotropos y en muestras de espesor uniforme. Como las costras de los suelos no cumplen con estas condiciones, este método se puede considerar apto sólo si se desea obtener un valor estimativo de la resistencia a la rotura con una alta dispersión.

Palabras clave: costras, macroporos, placas circulares.

INSTRUMENTAL DEVELOPMENT AND MEASURING OF THE RESISTANCE TO THE SOIL CRUSTS FRACTURE

SUMMARY

The study of the measuring of the resistance to the soil crusts fracture is useful to evaluate their effects on the infiltration and the plantlets emergence. After a laborious bibliographical revision about experimental methods developed to measure such resistance since 1953, had been done, a method which imitated the plantlets emergence was reproduced at Laboratory. It was tested on soils crusts and also on isotropous materials taken as evidence to evaluate and tell the experimental errors of the method itself from the inherent fluctuation of the kind of materials. The measuring method was based on and justified by an exhaustive physics analysis performed on the break phenomenon, both in homogeneous isotropous materials and anisotropous. In spite of its extension, the whole version of this analysis is registered in an Apendix in Spanish, and it is at investigators disposal in the Library of the Agronomy College. This report also shows a detailed description of the construction and handling of measurement device. This method was satisfactory on homogeneous and isotropous materials and on uniform thickness samples, but on soils crusts because they don't satisfy those conditions. In this last case, the method will be considered apt to obtain estimatives resistance values with high dispersion degree.

Key words: crusts, macropores, circular plates.

INTRODUCCION

Las costras superficiales poseen unos pocos milímetros de espesor y difieren considerablemente de la estructura de la capa subyacente. Esta capa superficial o costra, se caracteriza por tener pocos

¹ Cátedra de Física, ² Cátedra de Estadística. Fac. de Agronomía. Av. San Martín 4453, Buenos Aires, Argentina.

macroporos, alta densidad aparente y, a menudo, estratificación y orientación de las partículas de diversos tamaños. También suele ser más dura que el resto del suelo debido al limo y sílice depositados en su superficie. Suelos con bajo contenido de materia orgánica y alto nivel de sodio intercambiable desarrollan costras con más facilidad, aumentando su resistencia a la ruptura a medida que aumenta el porcentaje de éste último (Kemper y Miller, 1975). En la formación de la costra también es importante la historia previa de humedad y la velocidad de secado que ha tenido el suelo (Kemper *et al*, 1975). La influencia de las gotas de lluvia en la formación de la costra, ha sido estudiada entre otros, por Tarchitzky *et al*, (1984). El impacto de las gotas destruye los agregados de la superficie del suelo, desagregando las partículas, cerrando los macroporos, produciéndose la compactación de la superficie con la consecuente disminución de la tasa de infiltración. Si la superficie del suelo se mantiene húmeda, los agregados del suelo no se microfisuran y la erosión, al igual que la resistencia de la costra se mantienen bajos. Las etapas de la formación de las costras en relación con la cantidad de lluvia caída, que originan el desplazamiento de las partículas y el consiguiente lavado del suelo, fueron estudiadas por Le Bissonnais *et al*, (1989). Este autor investigó la evolución de la costra en agregados secos al aire y en otros previamente humedecidos. Luego de someterlos a la acción de la lluvia artificial, comprobó que en el caso de los primeros, éstos se microfisuraban, obstruyendo rápidamente los macroporos y produciéndose el anegamiento de la superficie. Los agregados previamente humedecidos, en cambio, no se microagrietaban y la formación de la costra era mucho más lenta.

El estudio de la formación de las costras de suelos y la medición de su resistencia a la rotura es importante para evaluar los efectos de la misma sobre la erosión, la infiltración y la emergencia de las plántulas. Por estas razones se han desarrollado a lo largo del tiempo distintos métodos para la medición de su resistencia. El método más usado fue desarrollado por Richards (1953). Consiste en el moldeado de muestras de suelo que le otorgan la apariencia de pequeños "ladrillos", las que posteriormente se someten al proceso de encostramiento superficial. Su rotura se produce cuando una carga gradualmente creciente, aplicada en el centro de la muestra, alcanza el valor necesario para lograrla. Con este valor calculó la tensión máxima de tracción que se desarrollaba en la sección transversal de la muestra, que denominó módulo de rotura. Lo expresó en función de las dimensiones de la muestra y de la carga aplicada. Richards, supuso que la muestra se comportaba como una pequeña viga horizontal homogénea e isotrópica sometida a flexión y para la cual se cumplían la "teoría común de las vigas, o teoría de la flexión" (Sloane, 1979).

Otro método de laboratorio es el que emplea una línea de pesca (Bennet *et al*, 1964). Uno de los extremos de la línea se entierra en el suelo, a 2 cm de profundidad y luego se provoca la formación de costra en la superficie. El tramo de hilo que emerge del suelo pasa por una polea fija y de su extremo se suspende un recipiente que se llena gradualmente con agua. El valor máximo del peso de agua que rompe la costra, es un índice de su resistencia a la rotura.

Los métodos de campo, de medición directa, utilizan un penetrómetro. Este posee un cuerpo principal cilíndrico con una punta en uno de sus extremos que se introduce en el suelo. Dicha punta puede ser giratoria (Liu y Thornbun, 1963) o fija. En una escala conveniente que posee el aparato se leen los valores de la tensión de corte.

En Page y Hole (1977) pueden encontrarse comparaciones de estos tres métodos y una modificación al método de Richards. Luego de emplearlos en ocho suelos provenientes de diferentes localidades inglesas, llegaron a la conclusión que el penetrómetro era el más sencillo de aplicar tanto en el laboratorio como en el campo, los valores de la resistencia para cada suelo presentaban menor fluctuación y el número de repeticiones del experimento superaba ampliamente a los de los otros dos métodos. Criticaron del método de Richards, la suposición que éste hacía de la isotropía y homogeneidad de los "ladrillos de suelo", propiedades no ciertas al encostrarse la capa superficial, con la consecuente disminución de la resistencia con la profundidad. Agregaron a esto, la fragilidad de las muestras que limitaba el número de repeticiones del experimento.

Otro método más reciente es el descrito por Painuli y Abrol (1986). Este método mide la resistencia de la costra mediante un dispositivo que imita la emergencia de la semilla.

Por todo lo expuesto, se fijaron como objetivos del presente trabajo:

- 1) Analizar desde el punto de vista físico el fenómeno de rotura de un material sometido a un proceso de deformaciones.
- 2) Ensayar el método de Painuli y Abrol en distintos materiales, entre ellos las costras de suelos, para lo cual se reprodujo en el laboratorio un dispositivo similar al utilizado por los autores, modificado convenientemente.
- 3) Fundamentar y justificar físicamente el método de Painuli y Abrol.
- 4) Realizar un análisis comparativo de los errores experimentales de los valores de la resistencia a la rotura obtenidos para los distintos materiales.

El trabajo incluye un Apéndice en castellano, que contiene una introducción a la elastoestática, la teoría de la rotura por flexión en materiales isótropos y anisótropos, y la deducción de las expresiones de las tensiones máximas desarrolladas en placas circulares empotradas. Por su extensión no se publicará, pero una copia del mismo estará a disposición de los investigadores en la Biblioteca de esta Facultad.

ANÁLISIS FÍSICO

Flexión en placas circulares isótropas

Una placa circular (fig.1), es un cuerpo cilíndrico, cuya altura puede ser o no despreciable con respecto al radio de sus bases. Una carga P aplicada sobre la placa, perpendicular a su plano medio, lo deformará generándose una superficie llamada "deformada", (fig.2). Los planos paralelos al medio, situados por encima de él, estarán sometidos a compresión y los inferiores a tracción. Si la carga está simétricamente distribuida respecto de su eje, todos los puntos equidistantes del centro de la placa tendrán igual deformación. La deformación de la placa la producen momentos llamados flectores que ocasionan desplazamientos de los puntos en la dirección y sentido de la carga aplicada, y que dependen de la sección considerada, de la forma en que esté aplicada la carga (distribuida, concentrada, etc.) y del tipo de sustentación de la placa (apoyo simple, empotramiento, etc.). Actúan dos momentos flectores M_r y M_t (Timoshenko y Woinowsky 1975), el primero a lo largo de las secciones cilíndricas y el segundo a lo largo de las secciones diametrales (fig. 3). En equilibrio de deformación, a estos momentos se oponen otros, relacionados con las tensiones normales a dichas secciones y que se desarrollan por acción de las fuerzas exteriores (cargas) aplicadas sobre la placa (fig. 3).

Para una placa circular empotrada a lo largo de su contorno, con una distribución uniforme de carga, en un círculo concéntrico de radio $c < a$, de valor $q = P/\pi c^2$, las tensiones máximas de tracción y compresión se producen en $r = c$. Sus expresiones son:

$$\sigma_{r_{\max}} = \frac{6P}{16\pi h^2} \left[4(1+\nu) \ln \frac{a}{c} + (1-\nu) \left(1 - \frac{c^2}{a^2} \right) - \left(4 - \frac{2c^2}{a^2} \right) \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{t_{\max}} = \frac{6P}{16\pi h^2} \left[4 \left((1+\nu) \ln \frac{a}{c} + 1 - \nu \right) - (1-\nu) \left(1 + \frac{c^2}{a^2} \right) - \left(4 - \frac{2c^2}{a^2} \right) \right] \quad (2)$$

que fueron deducidas a partir de las ecuaciones correspondientes a los momentos flectores máximos y donde ν es el módulo de Poisson.

Placas circulares anisótropas

Cuando el material es anisótropo, las ecuaciones se expresan en función de cuatro constantes que caracterizan sus propiedades elásticas según tres planos de simetría, si los hubiere en el material. Tomando estos planos como planos coordenados, las relaciones entre tensiones y deformaciones para el estado de tensiones planas en el plano xy , se expresan en la forma siguiente:

$$\sigma_{xx} = E'_x e_{xx} + E'' e_{yy} \qquad \sigma_{yy} = E'_y e_{yy} + E'' e_{xx} \qquad \sigma_{xy} = G e_{xy}$$

Teoría de rotura en los suelos

Los suelos, como la mayoría de los materiales sólidos, rompen por tracción o por corte (Terzaghi y Peck, (1973). La rotura por corte comienza en un punto de una masa de suelo cuando, en alguna superficie que pasa por dicho punto se alcanza una combinación crítica entre la tensión normal y la tangencial o "de corte". Se han desarrollado varios tipos de dispositivos para determinar e investigar el valor que adquiere esta combinación crítica bajo distintos estados de sollicitación. Además, la función que vincula las tensiones y deformaciones, es mucho más compleja en los suelos, ya que el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν), que son constantes en otros materiales, para un mismo tipo de suelo son función de la tensión de la deformación, del tiempo y de otros factores. Más aún, para los suelos, la determinación experimental de dichos valores es mucho más compleja. Las investigaciones necesarias se llevan a cabo usualmente por medio de ensayos de compresión triaxial.

MATERIALES Y METODOS

a) Sistema y método de medición

El equipo de medición construido, consta de una balanza ROVERBALL, cuya capacidad es de 20 kg, con su respectiva caja de pesas, siendo el menor valor de ellas 1g (fig. 4). La balanza se complementó con un soporte de muestra, señalado con la letra S en la figura 4, que se construyó en material acrílico según las dimensiones especificadas en la figura 5. Está constituido por dos placas cuadradas, una fija (inferior) y otra móvil (superior). Ambas están vinculadas en sus cuatro vértices por pernos pasantes y fijados a la placa inferior por medio de tuercas. En el centro de las placas se practicó un orificio para permitir el paso del sistema perforante. Se redujo su diámetro respecto del original para mejorar las condiciones de empotramiento. Entre las placas se colocó la muestra, que se sujetó suavemente mediante el accionamiento de las tuercas mariposas, que se enroscaron en los pernos. Un tubo vertical de acrílico, se pegó por su extremo superior a la placa inferior y el otro extremo a una pequeña mesa, que le sirvió de sostén, (fig.4).

El perforador, fig. 5, consistió en una varilla roscada, que termina en una punta esférica de acero y se practicó una rosca en el soporte de bronce, que le sirve de base, para variar a voluntad su longitud (modificación hecha al equipo original).

Para efectuar la medición, se colocó la balanza de manera tal que el platillo donde apoyaba el perforador, quedó debajo del soporte de la muestra, permitiendo a aquél pasar a través del tubo. Se colocó en el otro platillo un recipiente vacío de gran capacidad. Se taró la balanza a los efectos de que en esas condiciones quedara en equilibrio, con el fiel en la posición correspondiente al cero. Se ajustó la longitud del perforador de manera tal que la punta quedara rasante a la cara superior de la placa fija. La muestra se colocó cuidadosamente, habiéndole separado previamente, aquellas porciones de suelo que no se encontraban adheridas firmemente a la costra. Una manguera delgada, conectada a un grifo, proveyó de agua al recipiente y el caudal de entrada al mismo pudo mantenerse pequeño por medio de un pico con robinete regulable (modificación al equipo original). El aumento de la carga en

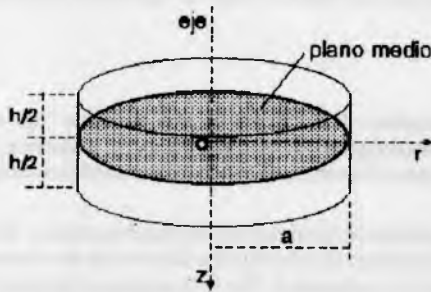


Figura 1: Placa circular

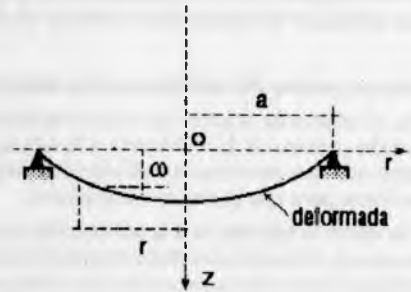


Figura 2: Deformación del plano medio

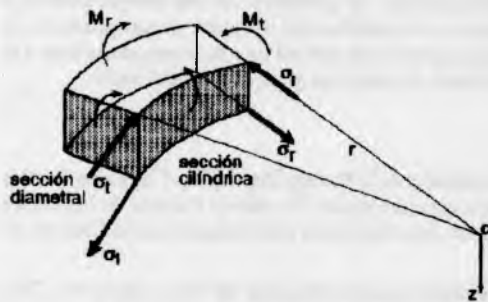


Figura 3: Tensiones y momentos flectores en las secciones de la placa

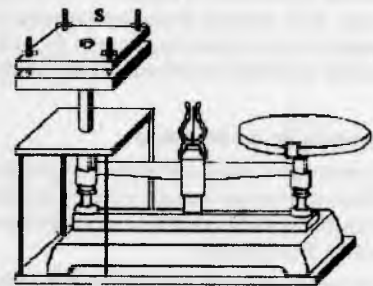
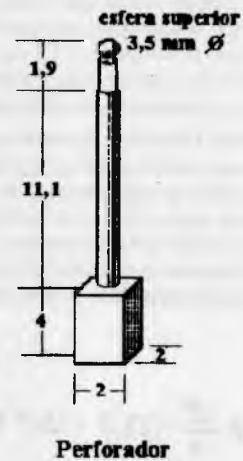
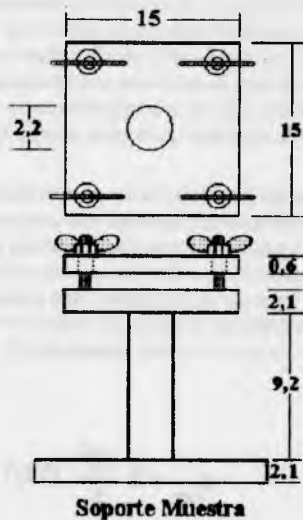


Figura 4: Balanza y soporte de muestra



medidas en cm

Figura 5: Dimensiones del soporte y del perforador

el platillo produjo un aumento en la fuerza, que de abajo hacia arriba ejerció la punta perforadora sobre la muestra (ésta es la simulación de la emergencia de las plántulas), hasta producir su rotura. El peso del agua en el recipiente fue una medida de la resistencia a la rotura de la costra¹.

b) Ensayos previos del método en otros materiales

Con el objeto de separar los errores aleatorios propios del método de medición de una supuesta "apriori" fluctuación genuina de la resistencia a la rotura en un material inhomogéneo como es el suelo, se realizaron los siguientes ensayos, previos a la medición de la resistencia sobre costras de suelo, empleando otros materiales testigo, que sirvieran para una posterior comparación

* Se midió la resistencia a la perforación en muestras rectangulares de igual tamaño de papel aluminio, de 20 μm de espesor, seleccionadas aleatoriamente a lo largo de un rollo (con el objeto de minimizar las diferencias de espesores que pudieran haber sido provocadas por el desgaste de los rodillos de laminación). Por la tecnología empleada en el proceso de fabricación, este material se supone altamente homogéneo e isótropo comparándolo con los suelos.

* Se realizaron mediciones de la resistencia a la perforación en muestras rectangulares de igual tamaño de poliestireno expandido (Telgopor), de 18 mm de espesor, seleccionadas de planchas de una misma partida y fabricante. Este material tiene una estructura inhomogénea, debido a la distribución irregular de sus granúlos, lo que constituye una variación espacial de su densidad. Se lo eligió suponiendo apriori que su comportamiento a la perforación resultaría intermedio entre los correspondientes al papel de aluminio y las costras del suelo.

c) Obtención de las muestras

El ensayo se efectuó con muestras tomadas de 6 suelos, provenientes de la Pampa Deprimida. Cada uno de ellos se codificó en número romano y en el Cuadro N°1 se exhiben sus características. El análisis textural de los suelos y la producción de las costras, que a continuación se detalla, han sido realizados por docentes de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes.

Con suelos, secos al aire, tamizados a través de 2 mm, se llenaron bandejas plásticas de 18 cm de ancho, 24,5 cm de largo y 5 cm de profundidad. Cada uno de los 6 suelos fue sometido a la acción del simulador de lluvias con el fin de provocar encostramiento superficial. El simulador cuenta con un bastidor elevado a 3 m del suelo, sobre el que se dispone un pico aspersor modelo Veject 80100, montado en una barra oscilante. La presión de salida del agua por el aspersor es de 6 libras/pulgadas² o sea 0,4218 kg/cm².

Las bandejas fueron secadas al aire y luego, para cada bandeja, se seleccionaron aleatoriamente las muestras cuya resistencia a la rotura se procedió a medir. La totalidad de muestras en el experimento fue de 75. El espesor de cada muestra de suelo, debido a la irregularidad que presentaba, se tomó como media aritmética de los valores medidos en 3 puntos distintos, seleccionados al azar. Se utilizó un calibre y la medición se aproximó al milímetro. Los valores del espesor oscilaron entre 0,6 cm y 2,1 cm correspondiendo a 1 cm el que registró mayor frecuencia en la totalidad de las muestras. No fue posible seleccionar igual número de muestras para cada uno de los suelos debido a que no todas las bandejas presentaron encostramiento.

Visto el apartado Flexión en placas circulares isótropas del Análisis Físico, se consideró cada muestra como una placa circular, ya que, si bien su borde era irregular, una vez empotrada, su contorno correspondió a la circunferencia del orificio de la placa de sujeción (fig. 5), de radio $a=1,1$ cm. Se las consideró gruesas ya que la relación $h/a=1$, siendo h el espesor, cuyo valor en la relación se tomó como media aritmética de los valores medios de espesores obtenidos en la totalidad del experimento. El peso P del agua en el recipiente, que produjo la rotura de la costra, se consideró uniformemente distribuido en un círculo concéntrico a la placa, de radio $c=0,175$ cm, igual al radio del perforador. Se reemplazaron los valores correspondientes de a , c y h en las ecuaciones (2,1) y (2,2) y se obtuvieron:

$$\sigma_{r_{máx}} = P \frac{10^3}{\pi} (13,5 + 19,7 v)$$

$$\sigma_{c_{máx}} = P \frac{10^3}{\pi} (19,7 + 13,5 v)$$

¹ Este equipo de medición ha sido empleado recientemente por el Ing. Agr. Luis H. Bisio en su trabajo de intensificación titulado "Efectos del encostramiento superficial sobre la emergencia de la colza".

Cuadro N°1: Características de los suelos

| Suelo | Textura | Arcilla % | Limo % | Arena % | Ras* |
|-------|------------------|--------------|-----------|------------|-------|
| I | Arcilloso limoso | 39,8 | 50,3 | 9,8 | 52 |
| II | Arcilloso limoso | 42,9 | 51,4 | 5,7 | 39,82 |
| III | Arcilloso | 55 | 20,1 | 24,9 | 40,4 |
| IV | Franco arcilloso | 39,6 | 34 | 26,4 | 48,15 |
| V | Franco | 23,6 | 42,48 | 33,92 | 10,96 |
| VI | Franco limoso | 24,1 | 65,2 | 10,7 | 23,45 |

*Relación de adsorción de sodio

Fuente: Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes

Cuadro N° 2: Valores medios de la resistencia a la rotura y coeficientes de variación en los distintos materiales

| Material | Resistencia (N) | CV % |
|------------------------|--------------------|---------|
| Papel aluminio | 4,309 | 7,1 |
| Poliestireno expandido | 6,251 | 16,0 |
| Suelo I | 16,050 | 51,4 |
| Suelo II | 5,531 | 76,1 |
| Suelo III | 9,740 | 45,4 |
| Suelo IV | 15,110 | 46,3 |
| Suelo V | 0,976 | 52,2 |
| Suelo VI | 6,577 | 58,8 |

que son las tensiones máximas (de tracción o compresión) que actúan en $r = c$, en función de la carga P aplicada. Con esto justificamos haber tomado el valor del peso del agua que consiguió la fractura de la muestra y no la tensión, como una medida de la resistencia a la rotura, ya que se desconoce el valor del coeficiente de Poisson (ν), debido a su dificultosa medición experimental. Correspondería igual justificación si el suelo se hubiera considerado anisótropo (ver Placas circulares anisótropas).

Se realizó un análisis descriptivo con el objeto de establecer una comparación de la variabilidad relativa presente entre los valores de la resistencia a la rotura en los distintos materiales, obtenidos con el instrumental descripto. Para ello se calcularon los coeficientes de variación (CV) (Ya-Lun Chou, 1977). Para estudiar posibles factores explicativos de la fluctuación de los valores de la resistencia a la rotura de las costras, se realizó un Análisis de Regresión, mediante un paquete estadístico de computación (Statgraphics, 1991). Se consideró a la resistencia como variable respuesta y como variables independientes al RAS (relación de adsorción de sodio), a los porcentajes de arcilla, limo y arena presentes en cada suelo y al espesor.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los valores medios de las resistencias a la rotura medidas para los distintos materiales, expresados en Newton (N), se exhiben en el Cuadro N°2. Para ello se calculó el peso del agua en el recipiente, que provocó la rotura de la costra, habiéndose utilizado, como valor aproximado de la aceleración gravitatoria en Buenos Aires $g = 9.80 \text{ m/s}^2$.

Se observó una gran fluctuación de los valores de la resistencia dentro de cada suelo, siendo mayor que las correspondientes al aluminio y poliestireno. Los coeficientes de variación (CV) correspondientes al análisis descriptivo realizado sobre los valores obtenidos de la resistencia a la rotura en los distintos materiales, se exhiben en el Cuadro N°2. Se verificó que la menor variación relativa se produjo en el papel de aluminio, que es justamente el material más homogéneo de todos los trabajados. Se comprobó, además, que la variabilidad presente en el poliestireno expandido, aunque más cercana a la del aluminio, es intermedia entre la de éste y la de los distintos suelos. La heterogeneidad de las costras está demostrada en los altos valores de CV obtenidos en todos los suelos. Frente a la magnitud de los CV, se consideró despreciable la indeterminación de apreciación en la medición de los valores de la resistencias de las costras de suelo.

En un primer Análisis de Regresión, se incluyeron todos los suelos, tomándose como variables

independientes las mencionadas en el ítem c) (Obtención de las muestras), no obteniéndose un coeficiente de determinación significativo. Posteriormente, el análisis se realizó separadamente sobre dos bloques de datos, uno de ellos perteneciente a los suelos francos y el otro a los arcillosos. Entre todas las funciones estudiadas (polinómicas y trascendentes), se encontró que las que mejor ajustaron a los datos experimentales, son las siguientes:

modelo 1
(suelos francos: IV, V, VI)

$$y = -1,019 + 0,004 x^2 + 5,041 z^3$$

modelo 2
(suelos arcillosos: I, II, III)

$$y = -9,053 + 0,008 x^2 + 3,443 z^2$$

donde: y: resistencia; x: RAS; z: espesor

No se consideraron las demás características de los suelos (porcentajes de arcilla, limo, arena) como variables independientes, pues los estimadores de los respectivos coeficientes de regresión no resultaron significativos.

Del análisis de los resultados se obtuvieron los coeficientes de variabilidad porcentuales de los modelos, siendo del 56 % para los suelos francos y del 52 % para los arcillosos. Estos valores representan los respectivos porcentajes de variabilidad de los valores medidos de las resistencias no explicados por la regresión. Es por esta razón, que cada uno de ellos representa la dispersión del error aleatorio presente en la medición de la resistencia a la rotura en los suelos francos y arcillosos, respectivamente.

CONCLUSIONES

Los altos valores de los errores aleatorios obtenidos en la medición de la resistencia a la rotura en las costras de suelos pueden asignarse a los factores que se exponen a continuación, mencionados en orden de causalidad creciente:

- a) La falta de inclusión de otras variables independientes no consideradas en los modelos propuestos.
- b) El número desigual de muestras para cada suelo.
- c) Propiedades físicas del material empleado.

La resistencia mecánica a la rotura, es una propiedad de característica puntual, ya que en el proceso de perforación del material con el método empleado se desarrollan tensiones de flexión y corte, cuya simetría en su distribución espacial depende de las propiedades de homogeneidad e isotropía del material utilizado.

La replicabilidad de las mediciones, aún en la misma bandeja, debieron hacerse sobre distintas unidades experimentales, seleccionadas aleatoriamente, dada la destrucción de la muestra una vez finalizada la medición. Esto llevó a considerar, por las razones inicialmente expuestas, la alta heterogeneidad del suelo y especialmente la de su costra, al variar la localización de la medición. Este factor se consideró de gran incidencia en la variabilidad de los valores de la resistencia. Los resultados experimentales validaron el supuesto expresado en el ítem b) (Ensayos previos del método en otros materiales), al contrastar aquellos valores con los correspondientes a los otros dos materiales usados como testigos, obtenidos con el mismo instrumental y método de medición. Por ello, se considera que un gran porcentaje del coeficiente de variación obedeció a la fluctuación espacial de la resistencia y que resultó imposible aislarla de otros factores aleatorios, presentes en todo proceso de medición, para poder evaluarla.

Finalmente, este método de medición es satisfactorio en materiales homogéneos e isotropos y en muestras de espesor uniforme. Como las costras de los suelos no cumplen con estas condiciones, este método se puede considerar apto sólo si se desea obtener un valor estimativo de la resistencia a la rotura con una alta dispersión.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Agrónomo Raúl S. Lavado por apoyar nuestra vinculación con la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes. A los Ingenieros Agrónomos Flavio G. Boem y Luis H. Bisio por facilitarnos las costras de los suelos y el análisis textural de los mismos. A la Licenciada en Física Susana Orden de Puhl y al Ingeniero Agrónomo Eduardo Sierra por el permanente estímulo. Al Profesor Celso O. Martínez por su participación en la construcción del equipo de medición.

BIBLIOGRAFIA

- BENNET, O.L.; ASHLEY, D.A. and DOSS, B.D. (1964). Methods of reducing soil crusting to increase cotton seedling emergence. *Agron. J.*, 56, 162-5.
- KEMPER, W. D.; EVANS, D. D. and HOUGH, H. W. (1975). Crust strength and cracking in "soil crust". Eds. J. W. Cary and D. D. Evans). *Tech. Bull. Agric. Exp. Stn. Univ. of Arizona, U. S. A.*, N° 214: 31-38.
- KEMPER, W. D. and MILLER, D. E. (1975). Management of crusting soils: Some practical possibilities. In soil crust. (Eds. J. W. Cary and D. D. Evans) *Tech. Bull. Agric. Exp. Stn. Univ. of Arizona, U. S. A.*, N° 214: 31-38.
- LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. and JAMAGNE, M. (1989). Laboratory experimental study of soil crusting: Relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. *Catena*. vol. 16, p. 377-392. Cremlingen, Germany.
- LIU, T.K. and THORNBURN, T.H. (1963). Investigation of surficial soils by field vane test. 66th Annual Meeting Papers. *ASTM Special Technical Publication* N°351.
- PAGE, E. R. and HOLE, B. J. (1977). Soil crust strength measurement. *Commun. in soil sci. and plant anal.* 8(2): 139-148.
- PAINULI, D. K. and ABROL, I. P. (1986). Effects of exchangeable sodium on crusting behaviour of a sandy loam soil. *Australian Journal of Soil Research*, 24: 367-376.
- RICHARDS, L. A. (1953). Modulus of Rupture as an index of crusting of soil. *Soil Science. Soc. Am. Proc.* 17: 321-323.
- SLOANE, A. (1979). Resistencia de Materiales. Segunda Edición. Editorial Montaner y Simón.
- TARCHITZKY, J.; BANIN, A.; MORIN, J. and CHEN, Y. (1984). Nature formation and effects of soil crusts formed by water drop impact. *Geoderma*, 33: 135-155.
- TERZAGHI, KARL.; PECK, R. (1973). Mecánica de suelos en la ingeniería práctica Edit. Ateneo.
- TIMOSHENKO, S. and WOINOWSKY, S. (1975) Teoría de Placas y Láminas. Editorial Urmo.
- YA- LUN CHOU (1977). Análisis Estadístico. Segunda Edición. Editorial Interamericana.