

ORIGEN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURACIÓN DE UN LOESS PAMPEANO¹

Víctor Alejandro Rinaldi², María Pía Cruz³, Julio A. Capdevila⁴ y Juan José Clariá⁵

Resumen: La estructuración en los loess pampeanos primarios de origen eólico y en los limos loessoides redepositados (loess secundarios) aparece como una cementación diseminada en toda la masa de suelo o en forma de concreciones localizadas. Los cementantes principales en estos suelos son el carbonato, yeso, sílice amorfa y óxidos férricos. La caracterización en cada caso requiere de ensayos físicos y químicos específicos. El empleo de observaciones visuales de cortes frescos, análisis químicos y microscopio electrónico permiten evaluar correctamente los tipos y características de la estructuración. En este trabajo se muestra que ensayos físicos de análisis granulométrico y la medición de velocidad de propagación de ondas realizadas sobre muestras estructuradas y desestructuradas resultan muy adecuados para cuantificar el efecto de la estructuración y su evolución con las variaciones del estado de tensiones aplicado.

Palabras clave: cementación, loess, suelo estructurado.

ORIGIN AND CHARACTERIZATION OF A PAMPEAN LOESS STRUCTURATION

Abstract: The structuration of Pampean loess of eolian origin (primary loess) and loessial silts (secondary loess) takes place as a disseminated or as well-localized cemented nodules. Calcium carbonates, gypsum, iron oxides and amorphous silica are the main cementing agents. Characterization of loess structuration is usually determined from specific physical and chemical tests. Visual inspection of fresh exposed surfaces, chemical analyses, and scanning electron microscope observations allow the proper characterization of the type and the main properties of the structure. This work shows that physical tests based on the grain size particle analysis performed on unstructured and structured samples are well suited for the evaluation of soil structure and its evolution under variations in the applied states of stress.

Keywords: cementation, loess, structured soil.

INTRODUCCIÓN

Los suelos eólicos de la Formación Pampeana han sido depositados entre el Mioceno Superior y el Holoceno superior. Los depósitos más antiguos datan de la fase orogénica de los Andes ocurrida en el Mioceno superior que han sido transportados por los vientos secos provenientes del océano Pacífico. Las acumulaciones de sedimentos en algunos casos alcanzan varios cientos de metros (Teruggi, 1957; Zárate, 2003). El origen de la estructuración del loess está ligado a la formación geológica del sedimento o depósito donde se encuentren y a procesos postdeposicionales a los cuales han sido sometidos en los distintos ambientes. Mientras que el origen del loess primario es netamente eólico (Frenguelli, 1955; Manzur, 1995), el loess denominado secundario se corresponde con una composición mineralógica y granulométrica similar, modificado por procesos diagenéticos posteriores. Estos procesos incluyen saturación o redeposición originados luego de una ocurrencia de erosión y transporte fluvial. De esta forma, un suelo loésico primario o secundario no deja de ser granulométricamente un suelo limoso cuyo tamaño de granos de la fracción más abundante varía entre 0,06 mm hasta 0,002 mm. En el Sistema de Clasificación Unificada, el loess se encuadra dentro de los grupos ML, CL o CL-ML. Tanto la granulometría, forma de partícula y plasticidad del loess puede variar ligeramente según sea su distancia de transporte desde la fuente de origen del material de transporte y sus procesos diagenéticos posteriores. En general los loess

¹ Artículo recibido el 28 de septiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: vrinaldi@com.uncor.edu

³ Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba. E-mail: mariapiacruz@yahoo.com.ar

⁴ Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: jcapdevila@com.uncor.edu

⁵ Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. E-mail: jclaria@com.uncor.edu

secundarios y aquellos depositados en ambientes más tropicales poseen un mayor contenido de arcilla y plasticidad más elevada. Por otro lado, los depósitos próximos a la fuente de formación poseen una fracción de arena mayor y partículas más redondeadas mientras que los más alejados son de forma elongadas con el eje principal orientado en forma subhorizontal y en la dirección de deposición. Debido a su origen eólico, la densidad seca usualmente se encuentra entre 12.5 kN/m^3 y 14.5 kN/m^3 y su fábrica resulta estable en los loess primarios debido fundamentalmente a su condición natural de semisaturación (usualmente la humedad natural oscila entre 12% y 15%). En el caso de los loess de tipo secundario, la densidad natural no resulta muy diferente a la del suelo originario, sin embargo su estabilidad estructural se ve incrementada por los aportes de distintos tipos de cementantes. Una característica distintiva de los loess argentinos es que las partículas de la fracción de limo y arena están formada mayoritariamente por vidrio volcánico con una gravedad específica muy acotada de 2.65 y algunos niveles muestran presencia de cenizas volcánicas (González Bonorino, 1966) que poseen reacción puzolánica a elevados pHs generando cementaciones muy estables. En general los espesores de loess primarios alcanzan unos pocos metros (menos de 10 m) y su diferenciación visual y textural respecto a los loess secundarios resulta dificultosa. Uno de los primeros mapas geológicos de limos y loess del depósito donde se localiza la ciudad de Córdoba fue desarrollado por Bodenbender (1890) y posteriormente Frenguelli (1923) presentó el perfil genérico en la Formación Pampeana de esta ciudad. Los primeros 20 m de profundidad donde se fundan la mayoría de las construcciones civiles corresponde a la formación del Cuaternario cuya génesis ha sido descripta más recientemente por Manzur (1995), Santa Cruz (1978), Sayago (1978), y Zamora (1991). En los trabajos de Rocca (1985), Moll y Rocca (1991), Rinaldi et al. (2007) se presenta una revisión exhaustiva del origen, formación, estructura y comportamiento geotécnico más relevantes de los loess primarios y secundarios del centro de Argentina.

La caracterización de la estructuración del loess es de fundamental importancia en la geotecnia con el fin de poder predecir su comportamiento mecánico y proveer consideraciones para el diseño de fundaciones de las estructuras. En este trabajo se presenta una revisión de las distintas formas en las cuales se puede estructurar el loess atendiendo a procesos postdeposicionales y de las metodologías actualmente vigentes para su tipificación y caracterización. Adicionalmente se presentan otras metodologías basadas en el uso de ensayos granulométricos y en la velocidad de propagación de ondas que permiten cuantificar el efecto de la estructuración del suelo de forma más sencilla y atendiendo a procedimientos usualmente empleados en el campo de la geotecnia.

ORIGEN Y TIPO DE CONCRECIONES EN LOESS

Concreciones de Carbonato

El origen de las concreciones calcáreas en loess se produce por la percolación de aguas carbonatadas, y posterior evaporación, mediante la cual se generan precipitantes cementados en los vínculos entre partículas. Este proceso se produce antes de llegar las aguas infiltradas al nivel freático donde precipitan las sales calcáreas alrededor de centros de atracción donde se produce un proceso electroquímico de concentración, dando lugar un núcleo casi esférico de la concreción cementada (Frenguelli, 1955). El origen del cementante, el carbonato de calcio, está dado por la presencia de sustancias orgánicas en descomposición, ayudadas por la intervención de actividad biológica microbiológica, como bacterias anaerobias (*Bacterium calcis de drew*). En particular, este tipo de bacteria capta el calcio disuelto en forma de cloruro y sulfato y lo fija en forma de carbonato dentro de la cavidad de alojamiento. No solamente se produce este proceso de cementación en raíces sino que también en una forma irregular, rellenando las cavidades de los huesos de mamíferos descompuestos rodeados de limos. Iriondo y Krohling (1995) aluden a tres tipos de precipitaciones de carbonatos de calcio en el Sistema Eólico Pampeano (SEP): a) Concreciones pedogenéticas botrioidales de carbonato impuro, b) Precipitados en forma de tabiques horizontales y sub-horizontales y c) Concreciones pequeñas (el diámetro promedio ronda los 2 cm). La Figura 1 presenta una muestra inalterada de loess donde se ven las concreciones de color oscuro y blanquecino, respectivamente.



Figura 1: Muestra de loess obtenida en la ciudad de Córdoba donde se indica la localización de nódulos calcáreos.

Concreciones de yeso

La ocurrencia de cementaciones de yeso en los loess se debe a las filtraciones meteóricas por lixiviación y re-cristalización de las cenizas superpuestas las cuales contienen entre otros elementos abundante sulfato de calcio amorfo y cristalizado (Frenguelli, 1955). Este mecanismo da lugar a la formación de pequeños nódulos granulados con un interior sub-cristalino, o podrían formar pequeñas rosetas debido a la unión de pequeños cristales.

Concreciones férricas

Este tipo de concreciones es propio de los limos de tipo secundarios y se caracterizan por ser de color pardo oscuro o pardo herrumbroso, cementando abundante material de la roca matriz. Son mineralizaciones de hierro productos organógenos (hierro de pantanos) propio de un ambiente lagunar o de pantanos.

Concreciones silíceas

La presencia de minerales de sílice en loess (por ej. vidrio volcánico) y minerales ligeramente cristalizados (por ej., productos de alteración de los feldspatos, geles coloidales y zeolitas) reaccionan con el agua a elevada alcalinidad (Quintana y Redolfi, 2001) formando cementantes muy fuertes y altamente estables tales como hidratos de aluminio y silicato de calcio hidratados (Fedá, 1994). Estas reacciones en los loess pampeanos se ven favorecidas por el elevado pH de los mismos (usualmente entre 8.0 y 9.5). En la ciudad de Córdoba se localizan capas más o menos horizontales de limos muy compactos y duros que reciben el nombre genérico de silcretos o también localmente conocidos como toscas.

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE UNA MUESTRA DE LOESS

La muestra de loess que se analiza en este estudio se extrajo de un pozo realizado en el sector sur-este de la ciudad de Córdoba a una profundidad de 4 m desde el nivel de terreno natural. Se trata de un suelo típico de este sector de la Ciudad donde la ocurrencia de situaciones de colapso del suelo por humedecimiento es muy frecuente. Los parámetros geotécnicos más característicos se indican en la Tabla 1. El color es marrón claro a pardo, según su contenido de materia orgánica. Los nódulos observados son color castaño oscuro.

Tabla 1: Propiedades geotécnicas de la muestra de loess de la Figura 5.

S.U.C.S.	w_n [%]	γ_{sh} [kN/m ³]	γ_{ss} [kN/m ³]	Límites de Atterberg		
				WL	WP	IP
ML	26,5	16,2	12,8	25,8	22,8	3,0

Referencias: S.U.C.S.: sistema unificado de clasificación de suelos; w_n : contenido de humedad natural; γ_{sh} : peso unitario húmedo; γ_{ss} : peso unitario seco.

La Figura 2 muestra fotografías con distintas ampliaciones obtenidas mediante microscopio electrónico (SEM) de los nódulos de loess retenidos en tamiz N° 200. Las fotos permiten observar que el nódulo está conformada por partículas principalmente de limo de tipo laminares o placas y minerales de arcillas en su superficie. En esta fábrica se aprecia un ordenamiento muy complejo y caótico donde se diferencian claramente microporos y macroporos espaciados. No se identifican en las fotografías la presencia de cementantes depositados sobre las superficies de las partículas más gruesas.

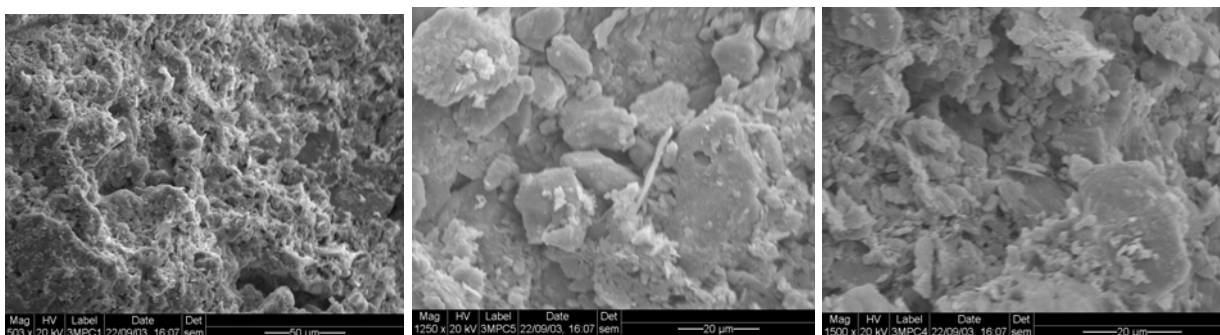


Figura 2: Fotografías del microscopio electrónico de nódulos retenidos en el tamiz N° 200 de la muestra de loess de la Figura 5.

La composición química de los nódulos retenidos en el tamiz N° 200 se presenta en la Tabla 2. En general, un aumento del contenido de carbonato implica un aumento en pH. Los valores de pH mayores de 8,2 involucran la presencia de

carbonato de sodio. Se observa un bajo porcentaje de carbonato de calcio y de sales totales disueltas. Este aspecto explica en principio la baja rigidez y cementación de los nódulos respecto al resto del suelo, su colapso a bajas presiones en la compresión confinada como se indica más adelante. Respecto al bajo porcentaje de carbonato de calcio en el suelo se puede deber a un corto período formacional del estrato estudiado de 4 m de profundidad. La escasa lixiviación de las aguas superficiales percoladas cargadas de oxígeno y de anhídrido carbónico en el suelo de una permeabilidad de 10^{-5} cm/s de clima semi-árido no alcanzan a dar origen a la acumulación de carbonatos en centros de atracción como podría ser un nódulo. El análisis de rayos X en nódulos retenidos en el tamiz N° 200 sin desmenuzar se muestra en la Figura 3. El resultado muestra una composición (en orden de abundancia relativa) de cuarzo, albita, calcita, micas, cloritas acompañadas de escaso anfíbol (tremolita-actinolita) y posiblemente palygorskita. Es posible que el material cementante sea la calcita, goethita (hidróxido de Fe) y hematita (óxido de Fe) en muy pequeñas proporciones.

Tabla 2: Resultados de análisis químicos de la muestra de loess de la Figura 5.

Parte de muestra gral. suelo	Materia orgánica [%]	Carbono [%]	PH en H2O	Cond. Eléctrica [mmhos/cm]	CaCO3[%]	Sales solubles totales [mg/l]	Cationes	Aniones
Nódulos	0,0	0,0	8,3	0,18	6,0	115,2	NC	NC
Resto	0,0	0,0	8,2	0,21	7,6	134,4	NC	NC

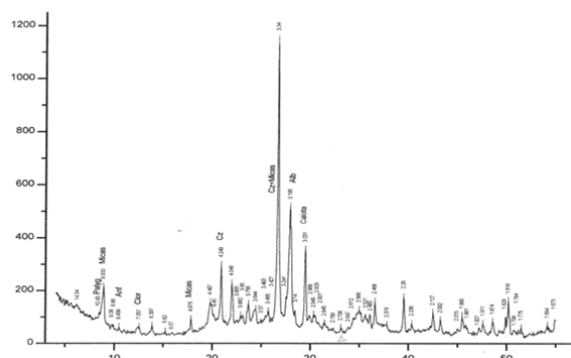


Figura 3: Espectro de difracción de rayos X de los nódulos de la muestra de loess ensayada.

MÉTODOS USUALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA ESTRUCTURACIÓN

Actualmente existen diferentes métodos que permiten determinar en forma cualitativa si un suelo presenta cementación estable. En todos ellos presentan algunas limitaciones, sobre todo en lo relativo al efecto de otros mecanismos asociados que no son fácilmente diferenciables tales como dispersividad a nivel de balance eléctrico entre fluido y partículas, disolución de cementantes solubles o reducción de fuerzas capilares. Entre los métodos más comunes se encuentran el ensayo Pinhole (ASTM D4647, empleado principalmente para determinar el grado de dispersividad) y el “Slaking Test” o ensayo de desmoronamiento (similar al ASTM D4644). Estos métodos son experimentalmente muy sencillos pero sus resultados son fundamentalmente cualitativos y pueden no ser conclusivos. Una alternativa explorada más recientemente (Fedá, 1994 y 2000; Lerouiel y Hight, 2003; Rinaldi et al., 2007) para comprobar la presencia de vínculos cementantes entre las partículas de suelo, es la ejecución de ensayos edométricos sobre muestras en estado de saturación. El primero de los ensayos es realizado sobre una muestra de suelo indisturbada (estructurada) y el segundo sobre una muestra remodelada y compactada a la misma densidad que la indisturbada. A partir de las diferencias en las curvas de compresibilidad obtenidas, es factible inferir el grado de cementación o estructuración del suelo (ver Figura 4).

Variación de las curvas granulométricas

Rinaldi y Capdevila (2006) desarrollaron una metodología para determinar el grado de cementación de un suelo, basada en la ejecución de dos ensayos granulométricos. Un ensayo logrado mediante el tamizado por vía húmeda de una muestra indisturbada de suelo que se somete a un lavado suave, sin la aplicación de esfuerzos mecánicos externos, y el otro logrado mediante el tamizado de una muestra del mismo suelo pero desmenuzada previamente de manera de romper la estructura de la misma. De la comparación de dichas curvas puede concluirse acerca del grado de estructuración del material. A modo de ejemplo, en la Figura 5 se observan las dos curvas granulométricas obtenidas para una misma muestra de loess de la provincia de Córdoba, en los dos tipos de ensayos mencionados. En esta figura se destaca la gran diferencia existente entre las curvas, la cual es atribuible a la existencia la estructuración.

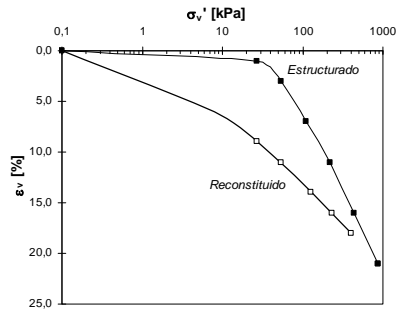


Figura 4: Curvas de compresibilidad para muestras saturadas de loess en estado inalterado y reconstituido a la misma densidad.

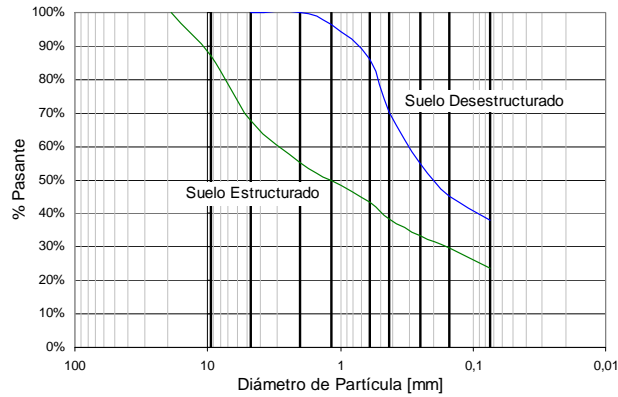


Figura 5: Curvas granulométricas para muestras de suelo loésico estructurado y desestructurado.

La aplicabilidad de este último ensayo es inmediata para la evaluación de la variación de la estructuración de un suelo bajo distintos estados de tensiones y deformaciones. La Figura 6 presenta las curvas granulométricas correspondientes al suelo en estudio determinadas para muestras ensayadas en compresión triaxial en donde se utilizó un confinamiento de 40 kPa y se han alcanzado distintos niveles de deformaciones para cada una de ellas. En el mismo gráfico se han incluido las curvas granulométricas determinadas para el suelo desmenuzado (desestructurado) y con la estructura preservada (estructurado) mostradas en la Figura 5 como referencias. Se observa que todas las curvas se encuentran aproximadamente dentro del espacio definido por las curvas límites (estructurados y desestructurado). Nótese que a medida que aumentan los niveles de deformaciones las curvas granulométricas tienden a desplazarse hacia la curva correspondiente al suelo totalmente desestructurado. Aún así, para niveles de deformaciones mayores que la rotura (por ej. curva de $\epsilon = 6\%$) se está aún muy lejos de la curva correspondiente al suelo completamente desestructurado. Este aspecto permite resaltar que para estos confinamientos el suelo no modifica substancialmente su estructura y se comporta como una estructura de bloques de granos de mayores dimensiones. Se destaca en este punto que la máxima deformación se alcanzó en todas las probetas de forma global sin localización de deformaciones, por lo que puede especularse que los cambios granulométricos descritos se producen en toda la muestra.

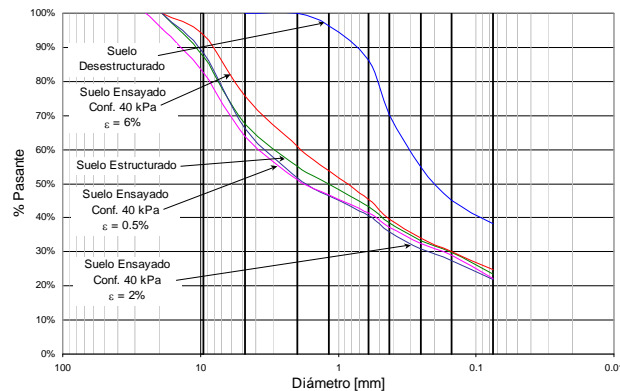


Figura 6: Curvas granulométricas obtenidas mediante lavado sobre el tamiz N° 200 sin desmenuzamiento de la estructura del suelo para muestras ensayadas en triaxial a 40 kPa, w% 22.7 % y $\gamma_d = 12.5 \text{ kN/m}^3$ y a diferentes niveles de deformación.

El objetivo que persigue el ensayo granulométrico descrito se relaciona directamente con la clasificación cualitativa del grado de heterogeneidad del suelo y de su evolución durante el proceso de carga, estimando el grado de rotura que manifiestan los agregados compuestos que forman las distintas fracciones del suelo. Para poder evaluar mejor la evolución de ello se define en este trabajo un índice de evolución granulométrico (IEG) como:

$$IEG = \frac{\%P_{ensayo} - \%P_{estructurada}}{\%P_{desestructurada} - \%P_{estructurada}} \quad (1)$$

en donde $\%P_{ensayo}$ es el porcentaje pasante de un diámetro determinado obtenido posterior a la aplicación de condición de tensión y deformación cualquiera, $\%P_{estructurada}$ y $\%P_{desestructurada}$ son los porcentajes pasantes de la curva granulométrica estructurada y desestructurada para el mismo diámetro de partícula del mismo suelo.

El índice IEG se expresa aquí siempre en relación con la diferencia entre la distribución granulométrica de una muestra de suelo desestructurada y la estructurada, es decir, manifiesta un valor cuantitativo de la modificación que sufre la granulometría del suelo luego de un determinado proceso mecánico y puede variar entre cero y uno dependiendo si la muestra ha conservado su estructura o se ha desestructurado completamente luego del proceso. La Figura 7.a muestra la variación de IEG para las muestras ensayadas en la celda triaxial alcanzando cada una de ellas distintos niveles de deformaciones. Los valores negativos no poseen significado físico y se deben en este caso a que las distintas muestras ensayadas varían ligeramente su composición inicial y grafican por debajo de la línea correspondiente al suelo estructurado. Aún cuando las diferencias entre curvas son mínimas, se pueden producir estos valores negativos por este motivo. De los resultados de la Figura 7 puede observarse que no se tiene desestructuración del suelo para niveles de deformaciones iguales o menores a 2%. Para valores de deformaciones correspondientes a la rotura (6%), se observa que los diámetros mayores son los que sufren una mayor desestructuración. Estos diámetros se reducen aumentando los porcentajes pasantes de los diámetros inmediatamente menores. El efecto en el aumento de los diámetros más bajos es menos marcado. La Figura 7.b presenta la variación del índice IEG para muestras ensayadas a distintos confinamientos y al mismo nivel de deformaciones. Nótese que en el caso de la muestra ensayada a confinamientos elevados aumentan los porcentajes pasantes correspondientes a los diámetros mayores y menores con menor influencia en los diámetros intermedios.

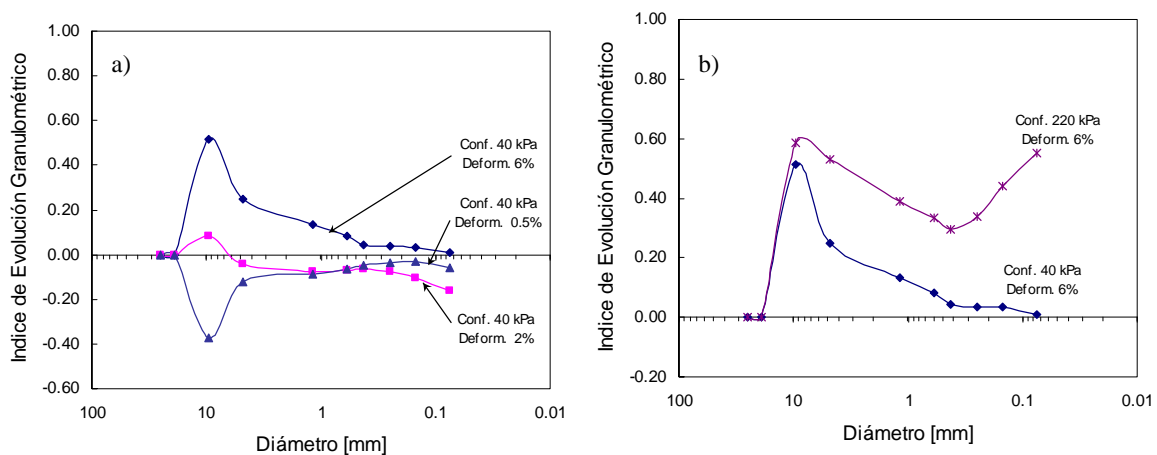


Figura 7: Curvas de variación del IEG en función del diámetro de las partículas de suelo para: a) muestras ensayadas en compresión triaxial a 40 kPa, $w\% 22.7\%$ y $\gamma_d = 12.5 \text{ kN/m}^3$ y a diferentes niveles de deformación; b) muestras ensayadas en compresión triaxial hasta alcanzar la rotura al 6% de nivel de deformaciones, $w\% 22.7\%$ y $\gamma_d = 12.5 \text{ kN/m}^3$ y a diferentes niveles de confinamiento.

Los resultados de las Figuras 6 explican el comportamiento del suelo obtenido en los ensayos triaxiales en lo que respecta a la evolución de la estructura del suelo. A bajos confinamientos y bajas deformaciones, el suelo se comporta como un sistema formado por bloques de mayor tamaño. Las fuerzas no son suficientes para desestructurar el suelo por lo que los bloques se deslizan y rotan unos sobre otros. En este caso el comportamiento del suelo puede asimilarse a un material de elevada fricción y baja cohesión. La rotura de los bloques a elevadas deformaciones se ve incrementada con los mayores confinamientos. En este caso los bloques se ven impedidos de desplazarse y rompen generando bloques de menores tamaños. A bajas deformaciones el cambio en la estructura del suelo es poco significativo, incluso a elevados confinamientos.

Variación de la velocidad de propagación de ondas

La evolución de la estructura de los suelos para distintos estados de tensiones y deformaciones también puede ser evaluada en el edómetro convencional, si al mismo se le adicionan cristales piezocerámicos (“bender elements”) en los cabezales superior e inferior de la manera descrita por Rinaldi y Clariá (1999). En este edómetro modificado, es posible medir la variación de la velocidad de propagación de ondas de corte y compresión con los esfuerzos verticales. La medición de la misma constituye una herramienta simple y adecuada para cuantificar el grado de estructuración (Fernández y Santamarina, 2001). La expresión que relaciona la velocidad de propagación de onda de corte (V_s) con la tensión media de confinamiento (σ_o) puede expresarse como (Santamarina et. al., 2001):

$$V_s = \alpha \cdot \left(\frac{\sigma'_o}{P_r} \right)^\beta \quad (2)$$

en donde P_r es una presión de referencia usualmente asumida como la presión atmosférica, y las constantes α y β son parámetros determinados experimentalmente. El valor de β indica la dependencia de la velocidad de propagación respecto al estado de tensiones y puede asociarse al tipo de contacto entre partículas (contactos hertzianos $\beta = 1/6$, contacto cementado $\beta = 0$). El valor de α depende fundamentalmente del tipo de empaquetamiento, relación de vacíos y fábrica. Cascante y Santamarina (1997) y Santamarina et al. (2001) muestran una dependencia entre α y β del tipo $\beta = 0.36 - \alpha/700$.

La Figura 8 muestra un típico resultado de medición de velocidad de propagación de onda de corte y compresión para una muestra inalterada de loess durante la ejecución de un ensayo edométrico. Ambas velocidades de propagación crecen rápidamente con la presión vertical hasta alcanzar un pico y luego decrecen suavemente. Durante la descarga, la trayectoria seguida corresponde a menores velocidades sin la presencia del valor de pico. Posteriormente, la recarga sigue una trayectoria muy similar a la descarga. El incremento inicial de la velocidad se cree que puede deberse al cierre de microfisuras provocadas por el proceso de extracción y tallado de la muestra. Posteriormente, la existencia de un pico de velocidad se debería a la desestructuración del suelo por lo cual cuando se produce la descarga las velocidades menores registradas corresponden a un suelo donde se han destruido, al menos parcialmente, los vínculos interpartículas.

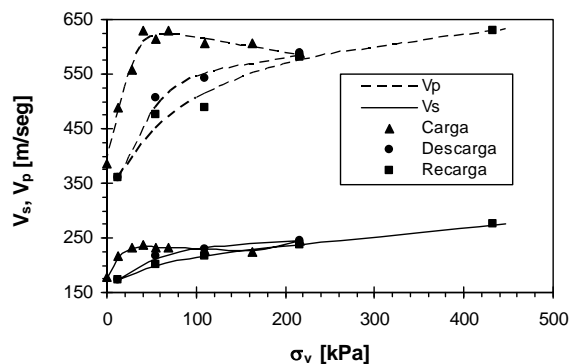


Figura 8: Variación de la velocidad de onda de compresión (V_p) y corte (V_s) con la tensión vertical (σ_v) para una muestra inalterada de loess con humedad ($w\%$) of 28.2 % y peso unitario seco $\gamma_d = 13.2 \text{ kN/m}^3$.

La comparación entre la variación de la velocidad de propagación de onda de corte entre una muestra inalterada y otra remoldeada preparada a la misma densidad y humedad es un indicador de la estructuración del suelo. En la Figura 9 se muestran estos resultados para distintas muestras de loess a una densidad constante y a varios contenidos de humedad ensayadas en el edómetro modificado. Nótese que la influencia de la estructuración se hace más evidente a bajas presiones verticales. La curva correspondiente a las muestras desestructuradas sigue una ley potencial similar a la que predice la ecuación (2) independientemente de su contenido de humedad mientras que en las muestras estructuradas se observa claramente el colapso de la estructura similar a lo descrito más arriba. A elevadas tensiones verticales las curvas correspondientes a las muestras remoldeadas e inalteradas tenderían a juntarse.

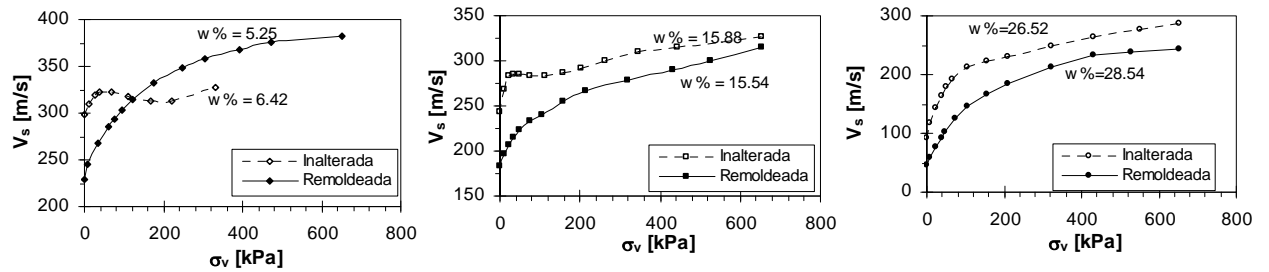


Figura 9: Curvas de variación de la velocidad de ondas de corte (V_s) con la presión vertical (σ_v), para muestras de loess inalterado y remoldeado a un peso unitario seco promedio de $\gamma_d = 12.6 \text{ kN/m}^3$ y con diferentes contenidos de humedad ($w\%$) ensayadas en compresión confinada.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una descripción de los orígenes de las concreciones en limos y loess que pueden tener lugar en la masa de suelo. Las formas, tamaños y composición química de los cementantes modifican significativamente el comportamiento mecánico del suelo tanto a humedad natural como saturado por lo cual la evaluación del grado de estructuración del loess es de fundamental importancia. Se presenta una revisión de métodos existentes que podrían ser empleados para la determinación del nivel de estructuración de los loess y se proponen otros basados en los análisis de las curvas granulométricas y la medición de velocidad de onda de corte. De los resultados presentados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Los loess son suelos muy heterogéneos debido fundamentalmente a los distintos mecanismos de estructuración posibles de ocurrir y a las distintas formas de distribuirse el cementante en la masa de suelo. Esta cualidad hace que resulte muy dificultoso la obtención de muestras representativas aún de sitios muy próximos. Por este motivo se hace particularmente importante evaluar y en lo posible cuantificar el tipo de estructuración existente en cada caso.
2. Un ejemplo de aplicación aquí presentado, muestra que la descripción de los tipos de cementantes y estructuración del loess puede ser realizado mediante observaciones visuales, análisis químicos, difracción de rayos X y microscopía electrónica (SEM). En general este tipo de estudios no son de rápida aplicación para fines prácticos.
3. Las observaciones visuales y los métodos cualitativos empleados para evaluar la dispersividad de los suelos pueden ser aplicables como una forma cualitativa y expeditiva de conocer el grado de estructuración del loess.
4. Los análisis granulométricos sobre muestras inalteradas y desestructuradas resultan muy expeditivos para determinar el grado de estructuración del loess. Estos análisis se pueden complementar con el método del doble edómetro (para muestra inalterada y reconstituida) y con determinaciones sencillas como son la reacción de las diferentes fracciones retenidas frente al ácido HCl.
5. El IEG propuesto en este trabajo muestra que los agregados sufren de escasas modificaciones durante los procesos de deformación por corte, siendo los agregados de mayor tamaño los que presentan una mayor evolución aún cuando el cementante es muy débil. Este resultado resalta aún más la importancia de la caracterización de los agregados a los fines prácticos.
6. La medición de la velocidad de propagación de onda durante la ejecución de los ensayos convencionales de compresión unidimensional y triaxial es de relevancia para estudiar la influencia de la estructuración del loess. Los resultados expuestos permiten identificar claramente el efecto de la desestructuración durante la aplicación de tensiones de corte en ensayos de carga unidimensionales.
7. Las formas de las partículas de loess, su orientación preferencial y la heterogeneidad de la distribución del cementante pueden generar anisotropía tanto del tipo inherente como inducidas por un proceso de aplicación de tensiones de corte. La valoración de la anisotropía de este suelo requiere de un programa de estudios más detallados a lo aquí expuesto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba por el apoyo financiero otorgado a través de distintos subsidios.

REFERENCIAS

- Bodenbender, G. (1890). "La cuenca del valle del río I en Córdoba", *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, Vol. XII, pp. 5-54.
- Cascante, G. y Santamarina, J.C. (1997). "Interparticle contact behavior and wave propagation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 10, p.p. 831-839.
- Feda, J. (1994). "Collapse of soil structure", Fookes, P.G. y Parry, R.H.G., eds., *Proceedings of the 1st International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, London U.K., Balkema, Rotterdam, pp. 237-240.
- Feda, J. (2000). "Specific soil behaviour – collapse", *An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, Melbourne, Australia, pp. 19-24.
- Fernández, A.L. y Santamarina, J.C., (2001). "Effect of cementation on the small-strain parameters of sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, No. 1, pp. 191-199.
- Frenguelli, J. (1923). "Apuntes de geología cordobesa", *Anales de la Facultad de Ciencias Educación*, Vol. I, pp.118-161.
- Frenguelli, J. (1955). "Loess y limos pampeanos", *Serie técnica y didáctica N° 7*, Universidad Nacional de La Plata, Argentina, Vol. I, pp. 5-66.
- González Bonorino, F. (1966). "Soil clay mineralogy of the Pampa plains, Argentina", *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 36, No. 4, pp. 1026-1035.
- Iriondo, M. y Krohling, D.M. (1995). "El sistema eólico pampeano", *Comunicación (Nueva Serie) 5 (1) del Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino"*, p. 19.
- Manzur, A. (1995). "Aspectos Genéticos de los selos presentes en Atum Pampa y Athos Pampa, Sierras Grandes, Córdoba, Argentina", Tesis doctoral presentada en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Moll, L. y Rocca, R. (1991). "Properties of loess in the center of Argentina", *IX Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, Chile, Vol. 1.
- Quintana, E. y Redolfi, E. R. (2001). "Evaluation of pozzolanic activity of Pampean loess", *XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, Vol. 1, pp. 243-246.
- Rinaldi, V.A. y Clariá, J.J. (1999). "Low strain dynamic behavior of a collapsible soil", *Pan-American Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Foz de Iguazú, Brasil, Vol. 2, pp. 835-841.
- Rinaldi, V. y Capdevila, J. (2006). "Effect of cement and saturation on the stress strain behavior of a silty clay", *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, Miller, G.A., Zapata, C.E., Houston, S.L. y Fredlund, D.G., eds., ASCE, Reston, VA, Vol. 2, pp. 1157-1168.
- Rinaldi, V., Rocca, R. y Zeballos, M. (2007). "Geotechnical characterization and behavior of Argentinean collapsible loess", en: *Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan T.S. et al., eds., Balkema, London, Vol. 4, pp. 2259-2286.
- Rocca, R.J. (1985). "Review of properties of loess soils", *CE 299 Report*, University of California at Berkeley, Berkeley, California, USA.
- Santamarina, J.C., Klein, K.A. y Fam, M.A. (2001). *Soils and Waves-Particulate Material Behavior, Characterization and Process Monitoring*, Wiley, New York, 488 p.
- Santa Cruz, J.N. (1978). "Aspectos sedimentológicos de las formaciones aflorantes al este de la Sierra Chica, provincia de Córdoba", *Revista de la Asociación Argentina de Geología*, Vol. XXXIII, pp. 232-244.
- Sayago, J.M. (1978). "Geomorfología aplicada del Valle de San Alberto", Tesis doctoral presentada en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Teruggi, M.E. (1957). "The nature and origin of Argentinean loess", *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 27, pp. 323 – 332.
- Zamora, E. (1991). "Cartografía, génesis y clasificación de los suelos del Noroeste de la provincia de Córdoba", Tesis doctoral presentada en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 170 p.
- Zárate, M.A. (2003). "Loess of southern South America", *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, pp. 1987-2006.