

CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES A NIVEL MICROESTRUCTURAL EN LA GENERACIÓN DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA SUELOS LOÉSSICOS PARCIALMENTE CEMENTADOS

Víctor A. Rinaldi¹, Juan J. Clariá² y Julio Capdevila³

^{1, 2 y 3}Laboratorio de Geotecnia, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. CONICET.

¹Email: vrinaldi@com.uncor.edu

²Email: jclaria@com.uncor.edu

³Email: jcapdevila@com.uncor.edu

Palabras clave: cementación, semisaturación, módulo de elasticidad, modelo bilineal.

Resumen

En la naturaleza, la aparición de cementantes en los suelos resulta muy frecuente y se debe fundamentalmente a procesos diagenéticos post-formationales. Los suelos parcialmente cementados presentan un comportamiento tenso-deformacional diferenciable respecto a los suelos incoherentes ampliamente estudiados en la Mecánica de Suelos. De acuerdo al tipo de cementante y como se encuentra distribuido en la matriz del suelo, se desarrollan fenómenos tales como: el aumento de la rigidez de la estructura a bajas deformaciones, aparición de un punto de colapso, generación de cohesión efectiva, y localización de tensiones. Los efectos mencionados generan importantes desafíos para ser cuantificados mediante ensayos de laboratorio a distintos niveles de deformación para luego ser trasladados a la modelación numérica del comportamiento de este tipo de suelos. En el presente trabajo se identifican y cuantifican los parámetros microestructurales y experimentales de mayor relevancia para el planteo de modelos de comportamiento de suelos loéssicos típicos del centro de Argentina, tanto en el comportamiento del módulo de elasticidad máximo (a pequeñas deformaciones) como en el comportamiento tensión deformación medido en compresión triaxial a grandes deformaciones. Se evidencia experimentalmente la existencia de cementación en el loess natural y en función de la misma, se muestra la inconveniencia de emplear los modelos clásicos de tipo potencial para representar las variaciones del módulo de elasticidad con el confinamiento, al igual que los modelos de tipo hiperbólicos para representar el comportamiento tensión deformación.

INTRODUCCIÓN

Los loess y limos loessoides (producto del transporte y la redeposición de los loess primarios) cubren gran parte de la Provincia de Córdoba y se caracterizan por estar formados por partículas de limos unidas entre sí por contactos de arcilla, generando macroporos susceptibles de sufrir procesos de colapso en presencia de agua. La deposición de cementantes, se produce por la percolación de agua, y su posterior evaporación, proceso mediante el cual se generan vínculos entre partículas (Houston et al., 1997). En algunos casos, el cementante es poco soluble en agua, lo que implica la presencia de nódulo cementados que influyen en el comportamiento tenso-deformacional del suelo aún en condiciones de saturación (Vatsala et al., 2001; Rinaldi et al., 2006). La presencia de algunos agentes cementantes le otorga a los limos loésicos características especiales tanto en su deformabilidad como en su resistencia al corte. El comportamiento tensión - deformación de este tipo de suelos presenta un quiebre muy marcado, pudiendo diferenciarse en la curva σ vs. ϵ , dos tramos cuasilineales. El primero de los tramos manifiesta un comportamiento de tipo elástico, mientras que en el segundo, el comportamiento es de tipo elastoplástico, con deformaciones importantes para moderados cambios de las tensiones.

En este trabajo se presentan resultados experimentales que permiten evaluar los efectos de la cementación en el comportamiento tensión - deformación del loess tanto a pequeños niveles de deformación específica (del orden de 10^{-5}) como a grandes niveles de deformación (hasta 10^{-2}). Los resultados mostrados y las interpretaciones del comportamiento realizadas, permiten discutir la conveniencia de modificar modelos de aplicación común en la geotecnia para ajustarse al comportamiento de los suelos loésicos parcialmente cementados.

CEMENTACIÓN

La cementación en suelos (también denominada estructuración) puede ser desde muy ligera, lo cual se verifica en suelos muy jóvenes, hasta muy desarrollada como es el caso de los suelos de climas semiáridos donde abundan los carbonatos y otros suelos donde la presencia de óxidos, sílice e incluso la temperatura y presión han ocasionado la generación de cementación. Los suelos en los que la cementación es alta, suelen también designarse como rocas blandas. La presencia de cementantes, en ocasiones, le confiere a los suelos características similares a las de materiales elastoplásticos. Un ejemplo es la manifestación de un valor de tensión de fluencia o colapso, a partir del cual se desarrollan deformaciones plásticas importantes, mientras que por debajo del mismo, las deformaciones son pequeñas y recuperables. Los vínculos cementantes presentan un comportamiento de tipo elástico y frágil, lo que implica que ante el aumento del nivel de deformación se produce el colapso de los puentes y el desarrollo de deformaciones plásticas. La identificación de un comportamiento como el descrito, producido por cementantes, tiende a enmascararse en los suelos semisaturados, en los que las fuerzas capilares producen efectos similares.

En los loess, el proceso de formación de la cementación se origina con la presencia de sales que actúan como agentes cementantes en los estratos superficiales. Cuando el agua (ligeramente ácida) percola en el suelo, se lavan las sales presentes y son arrastradas hasta que la concentración de las mismas alcanza un valor lo suficientemente elevado como para precipitar entre las partículas de suelo, produciéndose su deposición. En este caso, se generan estratos cementados de posición aproximadamente horizontal. Alternativamente, la concentración de sales puede producirse por la evaporación del agua ubicada en los meniscos, sales que llegan a precipitar y formar vínculos entre partículas (Houston et al., 1997; Rinaldi

et al., 2006). En zonas en las que el perfil de suelos es afectado por variaciones continuas del nivel freático, pueden generarse estructuras de suelos con niveles de cementación elevados. Esta cementación está en general compuesta por óxidos de hierro que dan al suelo una coloración rojiza muy característica. En el caso particular de los limos de la provincia de Córdoba, en determinadas áreas se han generado capas muy duras denominadas localmente como toscas, las cuales son producto de la cementación silícea generada por la presencia de cenizas volcánica.

Entre los minerales que forman los vínculos cementantes de los limos de la zona central de Argentina, el carbonato de calcio es el que se encuentra en mayor proporción. Otros cementantes presentes en menor proporción estos suelos, son óxidos de magnesio, aluminio y hierro. Es esperable que el comportamiento varíe según el agente cementante que forme el vínculo. Altos niveles de cementación carbonática (60% o más) están asociados con materiales descriptos como rocas, mientras que niveles menores se asocian a suelos (Rinaldi, 1994; Walsh, 1997). La solubilidad de los agentes cementantes es muy variable y depende de la composición y acidez del fluido de saturación. Así, la solubilidad de los carbonatos es muy elevada en presencia de aguas ácidas. En el caso de los minerales de sílice bien cristalizados, la solubilidad tanto en agua como en ácidos es baja. Sin embargo, los minerales de sílice amorfo (vidrio volcánico en loess) o pobremente cristalizados reaccionan con el agua alcalina, siendo solubles en ella (Rinaldi et al., 2006).

El efecto de las fuerzas de succión en estos suelos tiene tres consecuencias concurrentes: el primero de ellos es la rigidización de la estructura del suelo debido a la presencia de fuerzas capilares a causa del desarrollo de meniscos entre partículas. Este efecto se ve magnificado en los loess por la rigidización de los puentes de arcilla entre las partículas de arena y limo. El segundo efecto es la rigidización de los cementantes. Es sabido que la succión incrementa la resistencia al corte de los cementantes no solubles (Alonso y Gens, 1994), efecto que es notorio incluso en hormigones. Finalmente, la desaturación de los suelos aumenta la concentración de sales solubles que se precipitan en los contactos de las partículas incrementando su rigidez. Los efectos provocados por las fuerzas de succión y cementación son muy difíciles de evaluar por separado. Solamente en la condición saturada puede asumirse que la cementación real no soluble actúa en forma aislada, ya que la succión es nula.

Determinación de la Presencia de Cementantes

Actualmente, en la Geotecnia existen diferentes métodos que permiten determinar en forma cualitativa si un suelo presenta cementación. Entre los métodos más comunes, se encuentran el ensayo Pinhole (ASTM D4647) y el Slaking Test o ensayo de desmoronamiento (similar ASTM D4644). El Pinhole consiste en hacer circular agua por un orificio realizado dentro de una muestra de suelo y es generalmente empleado para determinar el grado de dispersividad de un material. El Slaking Test consiste en secar una muestra y sumergirla en agua durante 24 horas para que luego, de acuerdo a como el material se mantenga firme o se desestructure desmoronándose, pueda inferirse si presenta algún grado de cementación.

Una alternativa explorada recientemente (Fedá, 1994; Lerouiel y Hight, 2003; Rinaldi et al., 2006) para comprobar la presencia de vínculos cementantes entre las partículas de suelo, es la ejecución de un doble ensayo edométrico 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 remoldeada 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 1).

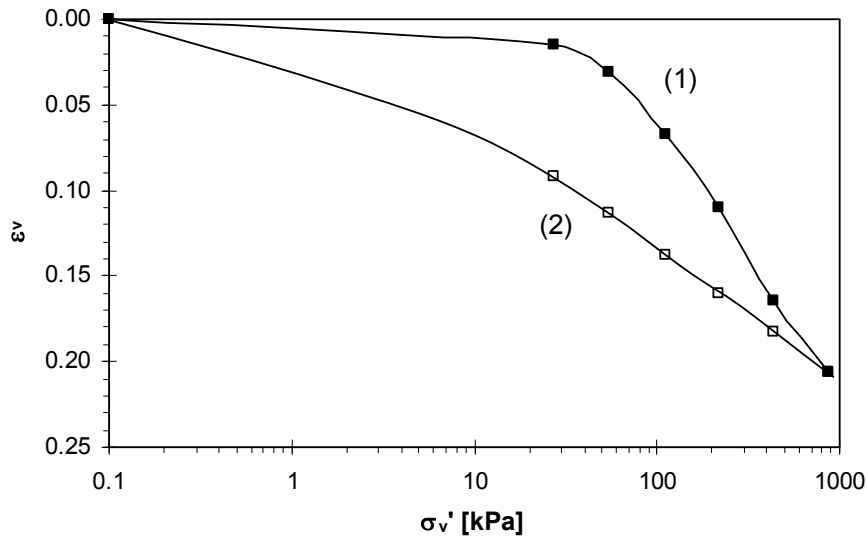


Figure 1: Curvas de compresibilidad para muestras saturadas. (1) Indisturbada y (2) Remoldeada.

Capdevila y Rinaldi (2004) y 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, y el otro logrado mediante el tamizado de una muestra del mismo suelo pero remoldeada, de manera de romper la estructura de la misma. De la comparación de dichas curvas puede concluirse acerca del grado de cementación del material. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se observan las dos curvas granulométricas obtenidas para una misma muestra de loess de la provincia de Córdoba, en los dos estados mencionados (estructurado y desestructurado). En esta Figura se destaca la gran diferencia existente entre las curvas, la cual es originada en la existencia de un importante grado de cementación.

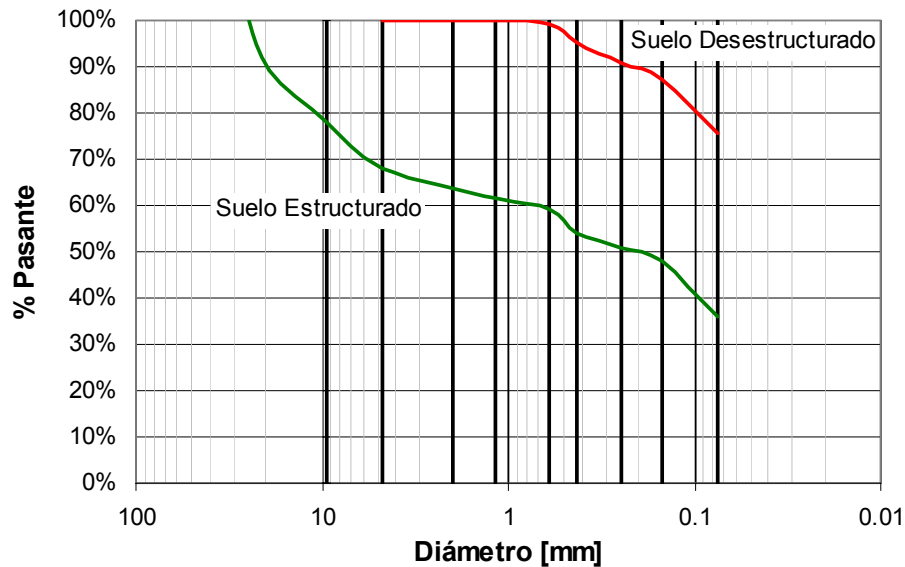


Figure 2: Curvas granulométricas para muestras de suelo estructurado y desestructurado.

EFFECTO DE LA CEMENTACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO DEL LOESS INALTERADO

Módulo de elasticidad máximo

En las Figuras 3 y 4 se presenta la variación de la deformación vertical y el módulo de corte máximo (G_{\max}) con la presión vertical en muestras de loess inalterado y parcialmente saturado ensayado en compresión confinada. En estos ensayos, el módulo de deformación G_{\max} del loess correspondiente a bajas deformaciones (del orden de 10^{-5}) se obtuvo a partir de la medición de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) y la densidad (ρ) mediante la expresión:

$$G_{\max} = V_s^2 \cdot \rho \quad (1)$$

En los ensayos presentados, la medición de la velocidad de ondas S se llevó a cabo en un edómetro modificado mediante la introducción de cristales piezocerámicos (bender elements) (Clariá y Rinaldi, 2000).

En la Figura 3 se han identificado con una flecha vertical los puntos correspondientes a las presiones de fluencia determinadas según el criterio de Casagrande. Por otro lado, en la Figura 4, se determinaron las presiones a las cuales el módulo de corte máximo (G_{\max}) presenta un pico. Se advierte que existe una marcada coincidencia entre las presiones de colapso y los picos desarrollados por el módulo de corte. A su vez, se aprecia como la presión de fluencia disminuye a medida que los contenidos de humedad aumentan.

Las observaciones realizadas, evidencian un comportamiento signado por la presencia de cementación. El mismo puede explicarse a partir de la rotura de los vínculos cementantes entre partículas en el momento de alcanzar la fluencia del material. La rotura de vínculos y pérdida de cementación, se traduce en el comportamiento a grandes deformaciones, en un colapso de la estructura interna. A partir del comienzo del colapso de la estructura y la consecuente pérdida de cementación y adhesión efectiva entre granos, se observan dos fenómenos: a) a niveles de deformación elevados (del orden 10^{-2}), se aprecia un aumento en la tasa de asentamientos (Figura 3), y b) a niveles de deformación pequeños (del orden de 10^{-5}), se ve una disminución en la velocidad de propagación de ondas y por ende en la rigidez y módulo de corte del material (Figura 4).

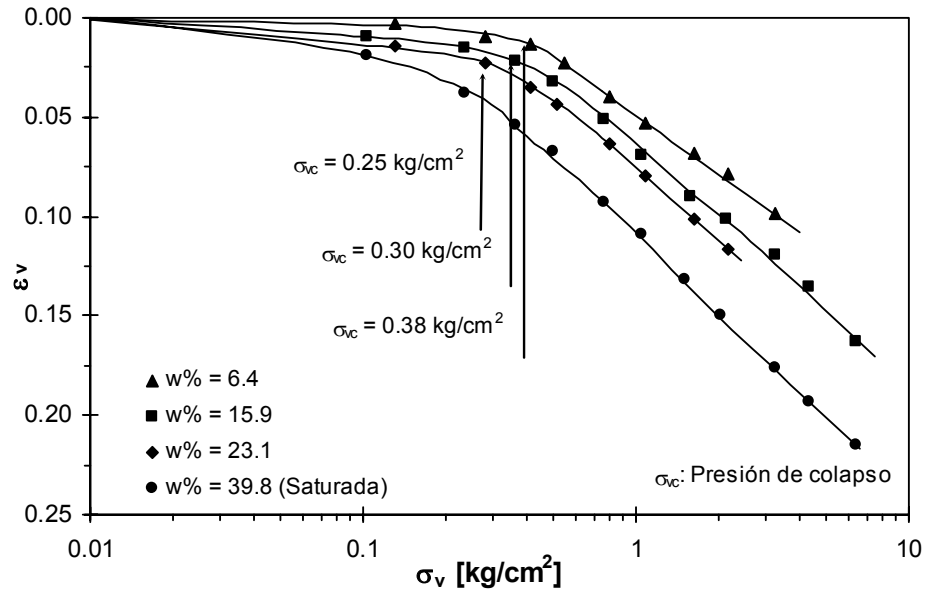


Figure 3: Curvas de variación de la deformación vertical (ε_v) con la presión vertical (σ_v) obtenidas en muestras de loess inalterado con diferentes contenidos de humedad ($w\%$) ensayadas en compresión confinada.

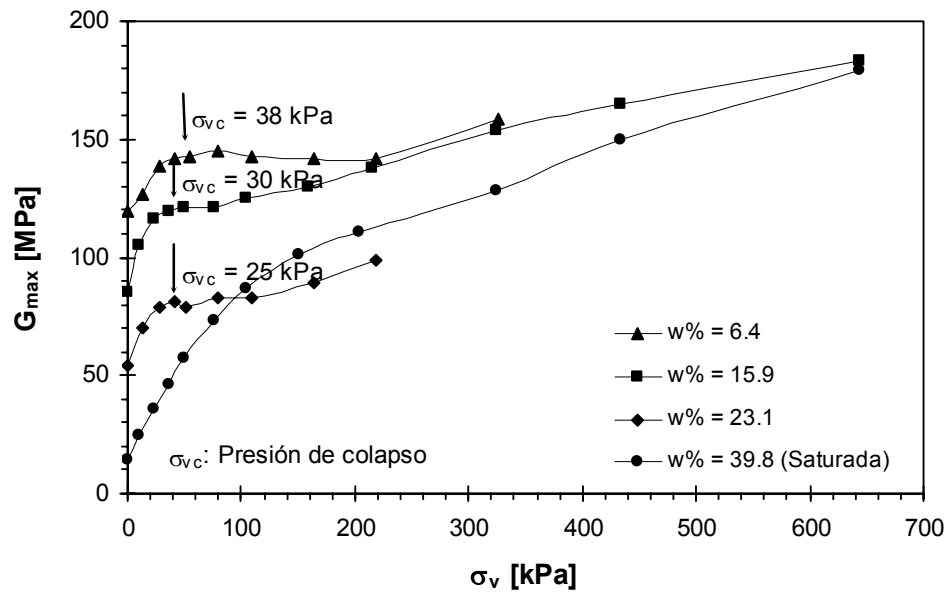


Figure 4: Curvas de variación del módulo de corte máximo (G_{max}) con la presión vertical (σ_v) en muestras de loess inalterado con diferentes contenidos de humedad ($w\%$) ensayadas en compresión confinada.

A su vez, se observa que para presiones de confinamiento mayores a la presión de colapso, las muestras con menores contenidos de humedad exhiben mayores módulos, evidenciando el efecto de la succión matricial en la rigidez correspondiente a bajas deformaciones. Estas diferencias se reducen a medida que crece la presión externa aplicada, ya que las muestras con mayores humedades resultan más compresibles y por lo tanto sufren mayores incrementos en la densidad, efecto que se traduce en el crecimiento de G_{max} (ver ecuación 1). El efecto de la

succión es tal, que puede ser asimilado al de una cementación aparente, pero que a diferencia de esta última, no se pierde al superar la presión de fluencia o colapso.

En la Figura 4 puede observarse que en la muestra saturada, a pesar de que las fuerzas de succión resultan nulas, el suelo presenta una rigidez diferente de cero cuando la presión aplicada es nula, la cual puede ser únicamente explicada mediante la presencia de sales no solubles en agua, que cementan los granos entre sí.

Más evidencia del efecto de la cementación en el comportamiento a bajas deformaciones del loess natural, puede verse si se procede a descargar y recargar el suelo en compresión confinada, tal como fuera mostrado por Rinaldi y Clariá (1999). Estos autores mostraron experimentalmente que una vez que se produce el colapso de la estructura y se manifiesta el pico en términos de velocidad de onda o módulo, al hacer subsecuentes descargas y recargas, el pico no aparece, siguiendo la variación de G_{max} con el confinamiento una ley de tipo potencial, similar a la mostrada por suelos granulares no cementados (Hardin y Richart, 1963; Hardin y Black, 1968). Una vez más, la pérdida de la cementación lograda durante el colapso desarrollado en la primera etapa de carga del suelo, hace que el material se comporte como un suelo no cementado.

En la Figura 5 se han graficado los resultados obtenidos para una muestra inalterada y otra compactada a la misma densidad y humedad. Se observa que el módulo máximo es mayor en la muestra inalterada, a pesar de que la succión matricial es la misma en ambas muestras. Este comportamiento, además de poner en evidencia el efecto rigidizante de la cementación, indicaría que durante el proceso de carga en el loess inalterado, la rotura de los vínculos no es total, tal como fuera postulado por Redolfi (1990). Por otro lado, se prueba que el remoldeo de la muestra ha provocado la destrucción de vínculos estables generados por la cementación entre granos.

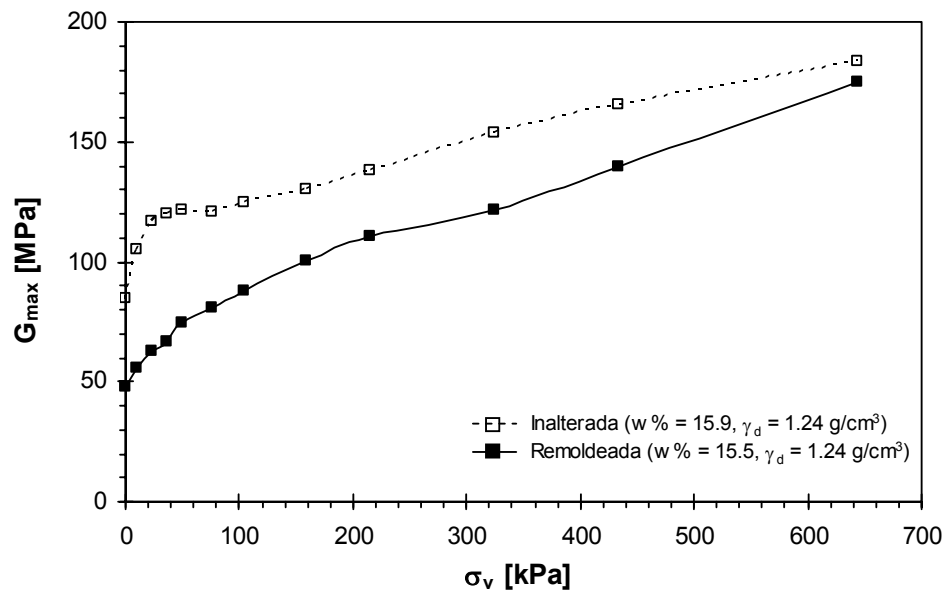


Figure 5: Comparación entre los módulos de corte máximos (G_{max}) de una muestra de loess inalterado y una muestra remoldeada a la misma densidad seca (γ_d) y humedad ($w\%$).

Comportamiento tensión deformación

En la Figura 6 se muestran las curvas de tensión - deformación obtenidas en compresión triaxial drenada en muestras de loess natural y remoldeado ensayadas en condición tanto saturada como semisaturada. Las muestras remoldeadas fueron compactadas de manera de lograr una relación de vacíos similar a la de las muestras inalteradas. En estas pruebas, las deformaciones de las probetas se midieron mediante transductores locales de desplazamiento (LDT) a los fines de evitar los errores inducidos por problemas de contacto entre los cabezales de la prensa y la muestra, tal como fuera mostrado por Capdevila y Rinaldi (2004).

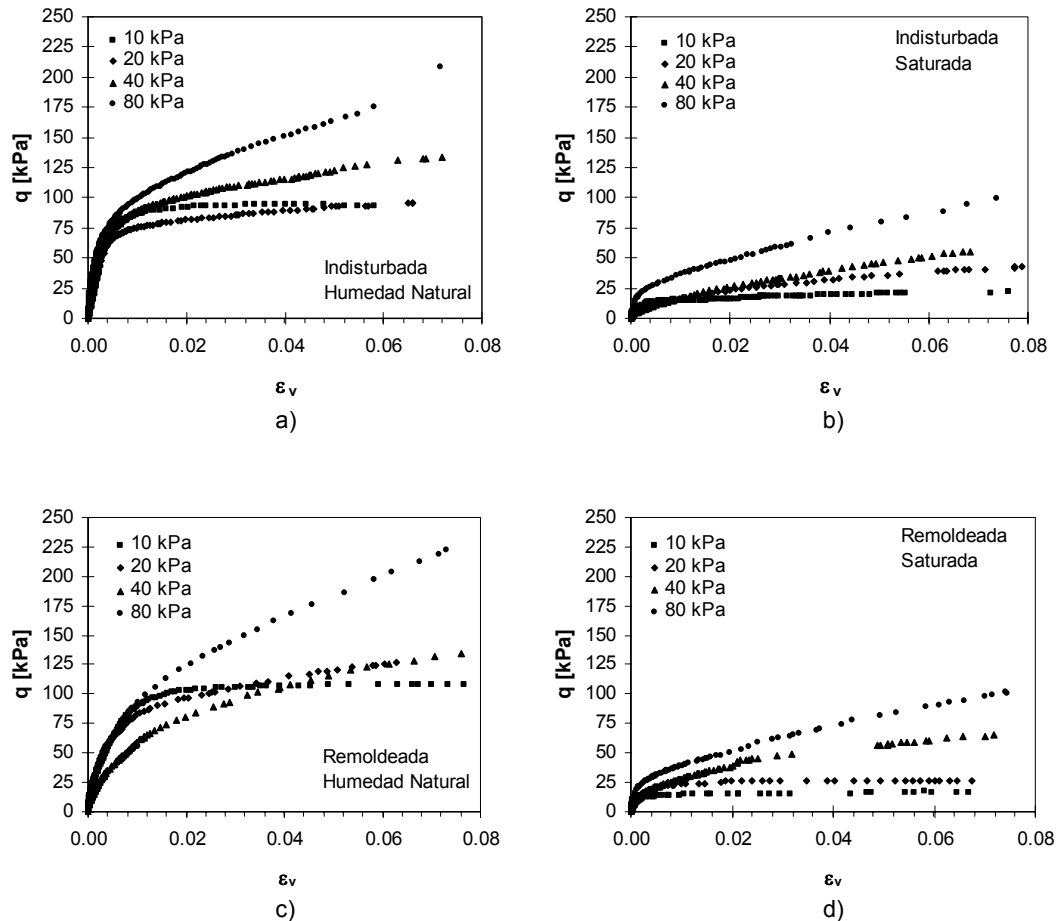


Figure 6: Curvas de variación de la tensión desviadora (q) con la deformación específica vertical (ϵ_v) correspondientes a muestras de loess indisturbado y remoldeado ensayadas a diferentes presiones de confinamiento y contenidos de humedad en una celda triaxial con LDT.

En la Figura 6 se puede apreciar que las muestras parcialmente saturadas desarrollan mayores valores de tensión desviadora máxima que las muestras saturadas. En general, se observa que para niveles de deformación mayores a 6%, mientras más elevada es la presión de confinamiento, mayor es el valor de la tensión desviadora. Cuando las deformaciones son menores al 1%, el efecto de la presión de confinamiento sobre la tensión desviadora no muestra una tendencia definida.

Las muestras inalteradas, exhiben un comportamiento tensión deformación de tipo frágil, constituido por dos tramos aproximadamente rectos, manifestando un quiebre en correspondencia con la presión de fluencia. En contraposición, las muestras remoldeadas desarrollan un comportamiento más dúctil, en el cual la presión de fluencia no es tan claramente identificable y la variación de la tensión con la deformación se aproxima mejor a una hipérbola que a dos tramos rectos.

Este comportamiento se condice con el observado en compresión confinada, en el cual las muestras inalteradas muestran una presión de colapso claramente identificable, cosa que no ocurre en las muestras remoldeadas. Nuevamente, esta diferencia puede ser atribuida a la pérdida de cementación lograda durante el remoldeo, la cual se traduce en un comportamiento más dúctil del material.

Resistencia al corte

En la Figura 7 se comparan las envolventes de falla correspondientes a muestras de loess indisturbadas y remoldeadas ensayadas en condición saturada y con valores similares de peso unitario seco (datos de las Figuras 6.b y 6.d). Los círculos de Mohr graficados corresponden a tensiones desviadoras determinadas a una deformación unitaria del 6%, asumida como deformación de falla. Se puede observar, que los valores de resistencia al corte a bajo confinamiento para las muestras inalteradas son ligeramente mayores que los correspondientes a las muestras remoldeadas. Esta diferencia se va reduciendo a medida que aumenta el valor de la presión de confinamiento. Asimismo, se aprecia que la envolvente de falla de la muestra indisturbada presenta un valor de cohesión verdadera para una presión de confinamiento igual a cero, cosa que no ocurre en la muestra remoldeada.

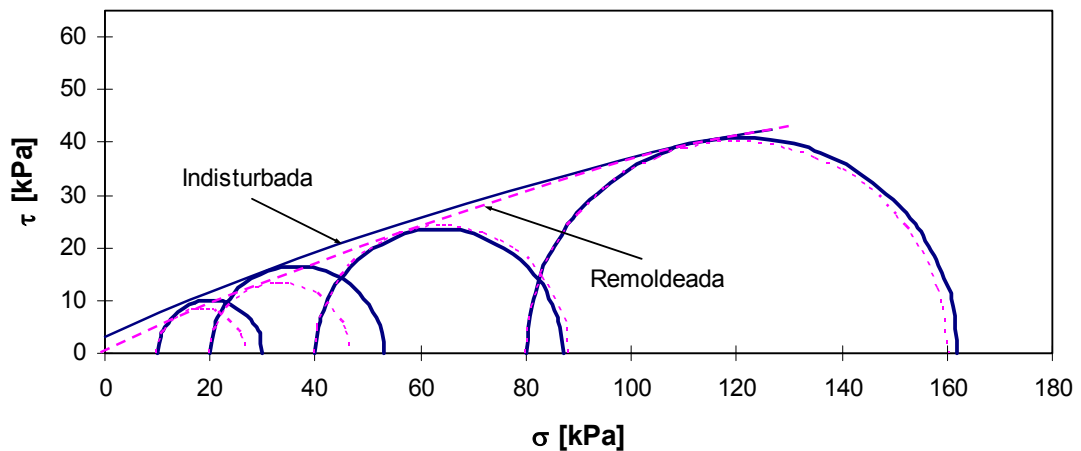


Figure 7: Envolventes de falla de Mohr - Coulomb correspondientes a muestras indisturbadas y remoldeadas de loess ensayadas en condición saturada y drenada (CD).

La Figura 8 muestra las envolventes de falla obtenidas en las muestras indisturbadas y remoldeadas con valores semejantes de peso unitario seco y humedad, ensayadas en condición no saturada y drenada (datos de las Figuras 6.a y 6.c). Nuevamente, los círculos de Mohr corresponden a una deformación unitaria del 6%.

Se observa que las resistencias obtenidas en loess natural y remoldeado son muy similares. A su vez, ambas envolventes muestran cohesión. En este caso, las fuerzas de succión son las

responsables de la cohesión desarrollada por las probetas. La similitud entre los resultados obtenidos entre la muestra indisturbada y la remoldeada evidencia la preponderancia de las fuerzas de succión sobre las de cementación.

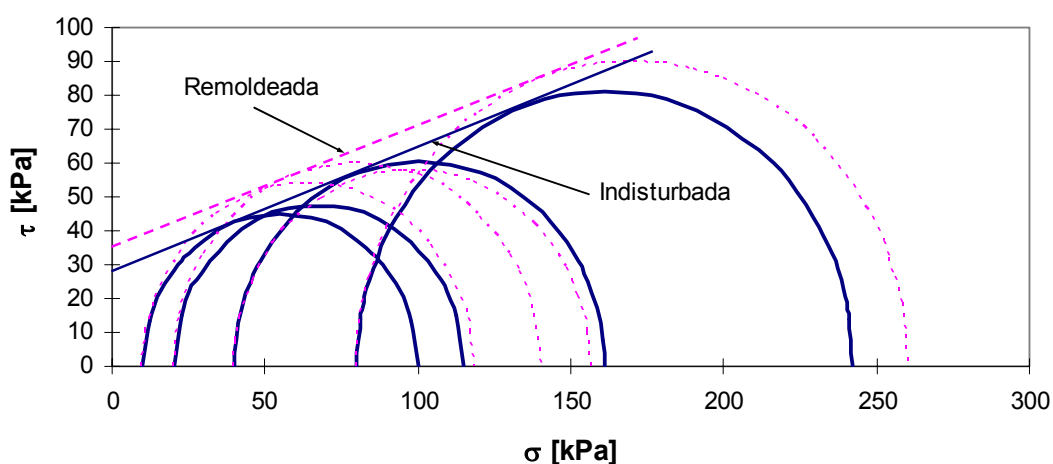


Figure 8: Envolventes de falla de Mohr - Coulomb correspondientes a muestras indisturbadas y remoldeadas ensayadas en condición no saturada y drenada.

Comportamiento generalizado

Módulo de elasticidad máximo

El comportamiento observado en el módulo de corte a bajas deformaciones, ha sido representado en forma esquemática en la Figura 9. A bajos confinamientos, la rigidez correspondiente a bajos niveles de deformación está determinada por una combinación de cementación y fuerzas de succión matricial. Cuanto más alto es el grado de saturación, menor es la contribución de las fuerzas de succión a la rigidez de la estructura del suelo (Cho y Santamarina, 2001) y por ende menor la rigidez. A bajos confinamientos, la rápida rigidización de las muestras al aumentar la carga externa refleja el cierre de las microfisuras y la manifestación de los primeros síntomas de colapso local, el cual es acompañado por un aumento en la tensión de contacto entre partículas. En esta etapa se acumula energía de deformación hasta alcanzar la presión de colapso, momento en el que se supera la resistencia al corte de los vínculos cementantes entre partículas y se produce el colapso masivo de la estructura. Luego del pico en la rigidez, el debilitamiento producido por la rotura de los vínculos entre partículas supera la rigidización producida por el aumento del número de contactos (número de coordinación). Una vez producido el colapso se crea una nueva estructura, en la cual, a altos niveles tensionales, la tasa de desvinculación entre partículas es baja y el comportamiento tiende a asimilarse al de un material granular no cementado, es decir G_{max} crece con el confinamiento según una ley potencial.

El comportamiento global descrito para las muestras de loess, se asemeja a los resultados reportados por Baig et al. (1997) y Fernández y Santamarina (2001) para suelos cementados. Estos autores notaron que:

- a bajos niveles tensionales y pequeñas deformaciones, la cementación rigidiza la estructura del suelo, lo que se traduce en un aumento de la velocidad de onda y el módulo de corte máximo.
- cambios de tensión, generalmente se traducen en rotura de vínculos entre partículas lo que genera decaimientos en la velocidad de onda y G_{max} .
- a altos niveles tensionales, la rigidez del suelo es controlada por las tensiones externas aplicadas.

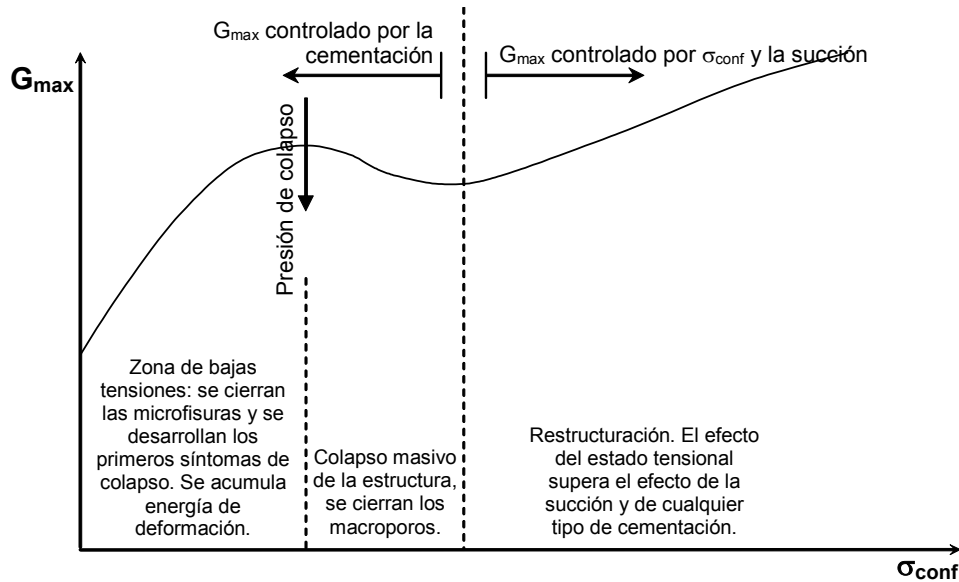


Figure 9: Esquema de la variación del módulo de corte máximo (G_{max}) con la presión de confinamiento (σ_{conf}) en loess inalterado y semisaturado.

Comportamiento tensión deformación

El comportamiento tensión - deformación del loess a deformaciones del orden de 10^{-3} y mayores, puede ser interpretado en términos de una interrelación entre el contenido de humedad, el nivel de deformaciones, la presión de confinamiento y el grado de cementación.

Debajo del umbral de fluencia, el comportamiento tensodeformacional de las muestras semisaturadas corresponde al de un material cementado con una variación lineal entre las deformaciones volumétricas y axiales (Airey y Fahey, 1991). El módulo de rigidez, a un confinamiento dado, está controlado inicialmente por los vínculos cementantes. Sin embargo, a medida que aumentan las deformaciones, el módulo comienza a ser controlado por los meniscos, ya son necesarias grandes deformaciones para superar las fuerzas capilares (Cho y Santamarina, 2001; Fernández y Santamarina, 2001). A medida que el suelo se va saturando, los cementantes se debilitan, las fuerzas capilares desaparecen y la rigidez pasa a estar controlada principalmente por el tipo y la cantidad del cementante.

En muestras saturadas la fluencia ocurre como consecuencia de la rotura de los vínculos cementantes y el grado de rotura está controlado por el tipo de cementante y la presión de confinamiento (Saxena y Lastrico, 1978). Una rotura parcial de los vínculos cementantes puede tener lugar por la sola aplicación de una alta presión de confinamiento, previa a la

aplicación de la tensión desviadora (Rinaldi et al., 2001). En este caso, la tensión de corte correspondiente a la fluencia resulta menor que la correspondiente a una muestra similar ensayada a menor confinamiento. En muestras no saturadas, la fluencia ocurre progresivamente ya que una vez lograda la decementación, continúan actuando las fuerzas capilares.

Después de la fluencia, el efecto que las componentes cohesivas y friccionales tienen en la resistencia al corte, varía con la fuerza de los vínculos cementante, las fuerzas capilares de succión y la presión de confinamiento. En las muestras ensayadas en condición saturada, la resistencia del loess luego de la fluencia está principalmente determinada por la componente friccional mientras que la cohesiva se torna relevante solamente a bajas presiones de confinamiento.

Las muestras de loess remoldeadas y preparadas con una densidad igual a la de las probetas indisturbadas, presentan un comportamiento tensión - deformación similar al correspondiente al de los suelos normalmente consolidados. Para una relación de vacíos constante, la resistencia al corte está principalmente determinada por el contenido de humedad y la presión de confinamiento. En condición de semisaturación, las muestras remoldeadas y estructuradas muestran envolventes de fallas similares, este efecto pone de manifiesto que la succión es el parámetro que gobierna la resistencia al corte del loess semisaturado y la cementación tiene una importancia menor.

Modelación del comportamiento

Módulo de elasticidad máximo

Los resultados obtenidos sugieren que la cementación y la saturación parcial tienen efectos similares en la rigidez correspondiente a pequeñas deformaciones (a fábrica constante) de los suelos. Puede notarse que en el loess, debido a la presencia de una rigidez pico coincidente con la fluencia, no es posible ajustar la variación del módulo de corte G_{max} con la presión de confinamiento por medio de modelos matemáticos clásicos de tipo potencial, utilizables en suelos no cementados, tal como fuera propuesto por Hardin y Richart, (1963); Hardin y Black (1968); Drnevich y Richart (1970); Seed e Idriss (1970); Alarcón Guzmán et al. (1989) y Shibuya et al. (1997), entre otros.

En la Figura 9, se han delimitado dos zonas claramente diferenciadas en el comportamiento del módulo correspondiente a bajas deformaciones. Una zona correspondiente a bajas tensiones, en la cual los efectos de la cementación entre partículas sobre la rigidez son dominantes, y otra zona a altas tensiones, en la cual, la cementación se ha perdido y la rigidez del suelo es controlada fundamentalmente por las fuerzas capilares de succión y las presiones externas aplicadas.

Basados en el comportamiento observado, se propone para ajustar la variación de G_{max} con la presión externa aplicada (σ_{conf}), el empleo de dos ecuaciones correspondientes a las diferentes zonas de comportamiento delimitadas. Las ecuaciones propuestas, son similares a los modelos potenciales clásicos, a los que se les agrega un término independiente que permite cuantificar los efectos de la cementación (en la zona de bajas tensiones) y la succión (en la zona de altas tensiones). Estas ecuaciones son de la forma:

$$G_{max} = A_1 + B_1 \cdot \sigma_{conf}^{\alpha_1} \text{ para } \sigma_{conf} \leq (\sigma_y), \quad (2.a)$$

$$G_{max} = A_2 + B_2 \cdot \sigma_{conf}^{\alpha_2} \text{ para } \sigma_{conf} > (\sigma_y) \quad (2.b)$$

siendo A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , α_1 y α_2 , constantes que dependen del contenido de humedad de la muestra ensayada y σ_c la presión de fluencia o colapso del suelo.

El límite entre la aplicación de la ecuación 2.a o 2.b, no es preciso. En el momento en el que se alcanza la presión de fluencia del material (σ_y), comienza el colapso masivo de la estructura y la rotura de los vínculos cementantes, en este momento se alcanza el pico en G_{max} . Sin embargo, este proceso no se produce en forma instantánea, sino que es necesario continuar incrementando la carga para alcanzar la rotura total de la cementación y entrar en la zona controlada por la succión y la presión. En virtud de los resultados presentados, puede asumirse de una manera razonable, que luego de alcanzar la presión de colapso, si se incrementa la carga externa, se entra en la zona controlada por la succión y las tensiones aplicadas.

En la Figura 10, se han aproximado mediante las ecuaciones 2, las mediciones correspondientes a las muestras de loess inalterado semisaturado presentadas en la Figura 4. Puede notarse que el ajuste entre las mediciones y el modelo propuesto es bueno.

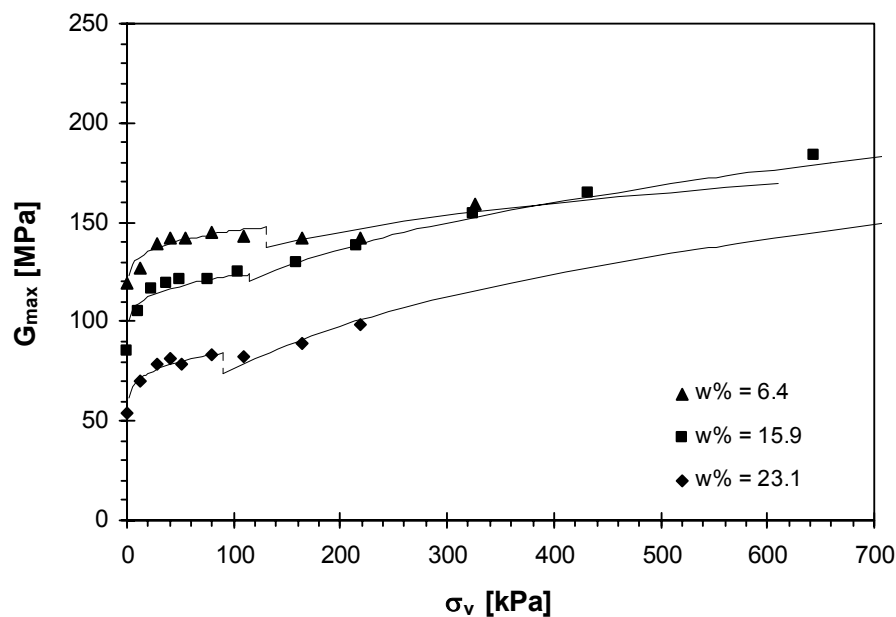


Figure 10: Ajuste de la variación del módulo de corte máximo (G_{max}) con la presión vertical (σ_v) en loess inalterado y semisaturado ensayado en compresión confinada mediante las ecuaciones 2.

Comportamiento tensión deformación

Para aproximar el comportamiento tensión (σ) deformación (ε) del loess natural a grandes deformaciones, se propone un modelo constitutivo de tipo bilineal de la forma:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ for } \varepsilon < \varepsilon_y$$

$$\sigma = \sigma_y + \left(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{E} \right) \cdot K \text{ for } \varepsilon > \varepsilon_y \quad (3)$$

donde E es el módulo elástico, K un módulo elastoplástico y σ_y y ε_y son la tensión y deformación de fluencia respectivamente. El módulo elástico E , correspondiente a grandes deformaciones, puede estimarse en función del confinamiento mediante los modelos potenciales clásicos (Duncan y Chang, 1970; Duncan et al., 1980 y Brinkgreve y Vermeer, 1998):

$$E = E_{\max} \left(\frac{\sigma_{\text{conf}}}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

en la que E_{\max} , es el módulo de elasticidad máximo correspondiente a pequeñas deformaciones (del orden de 10^{-5}), σ_{conf} es la presión de confinamiento, p_a es una tensión de referencia generalmente asumida igual a 1 atmósfera y el exponente n es una constante propia para cada condición de humedad y succión.

Dado que el módulo de Young correspondiente a pequeñas deformaciones (E_{\max}), se relaciona con el módulo de corte (G_{\max}) a través de la relación de Poisson (ν) mediante la expresión:

$$E_{\max} = G_{\max} \cdot 2 \cdot (1 + \nu), \quad (5)$$

la variación de E_{\max} con el confinamiento puede modelarse mediante expresiones de estructura similar a las ecuaciones 2.

Las Figuras 11 y 12 muestran el ajuste del modelo bilineal propuesto (ecuaciones 3) con las mediciones correspondientes a las muestras de loess inalterado ensayadas en condición tanto saturada como no saturada. Se observa que el modelo presentado aproxima razonablemente el comportamiento del loess natural ensayado tanto condición saturada como semisaturada. En el caso del loess remoldeado, la pérdida de fragilidad se traduce en una transición más gradual entre los tramos elásticos y elastoplástico del comportamiento. En este caso, la presión de fluencia no es tan clara y el comportamiento tensión deformación se ajusta mejor a un modelo hiperbólico que al bilineal planteado.

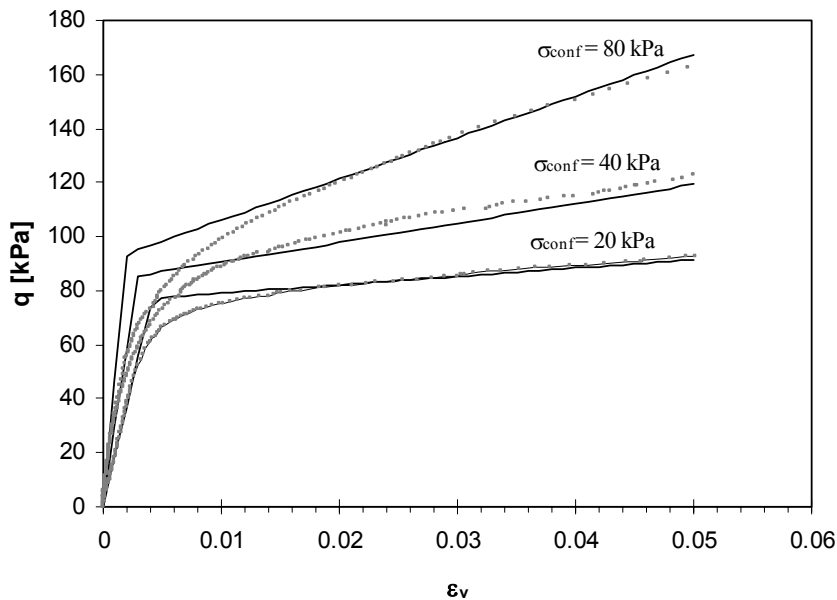


Figure 11: Ajuste del modelo bilineal (ec. 3) al comportamiento tensión deformación del loess natural ensayado en condición no saturada, para diferentes presiones de confinamiento (σ_{conf}).

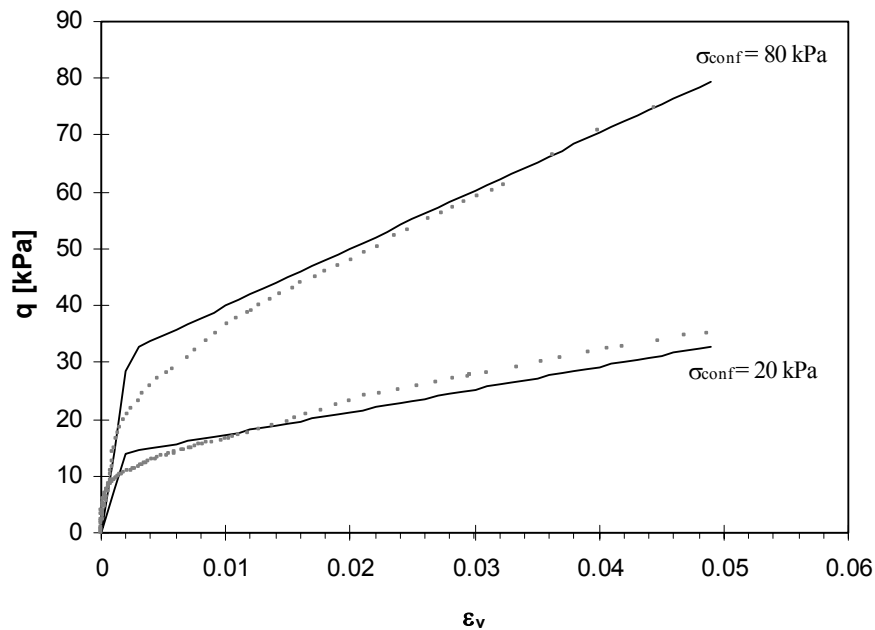


Figure 12: Ajuste del modelo bilineal (ec. 3) al comportamiento tensión deformación del loess natural ensayado en condición saturada, para diferentes presiones de confinamiento (σ_{conf}).

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que surgen del presente estudio pueden resumirse como sigue:

- La estructura del loess está conformada por una estructura cementadas, cuya rigidez y resistencia gobiernan el comportamiento tanto a grandes como a pequeñas deformaciones. A su vez, la rigidez y resistencia de estas cementaciones dependen del tipo de cementante y del fluido que ocupa los poros.
- La cementación entre granos en el loess natural se traduce en mayores rigideces a pequeñas deformaciones que en el loess remoldeado.
- La cuantificación del grado de cementación existente en el loess y demás suelos parcialmente cementados, puede realizarse por medio de la comparación entre las curvas granulométricas obtenidas en muestras estructuradas y desestructuradas.
- Tanto el módulo elástico a bajas deformaciones como el comportamiento tensión deformación a grandes deformaciones del loess inalterado, son altamente dependientes del contenido de humedad.
- La existencia de una rigidez / módulo diferente de cero en el loess saturado cuando la presión de confinamiento es nula, evidencia la presencia de sales no solubles que vinculan los granos entre sí.
- La rigidez del loess inalterado presenta un pico a una presión de confinamiento coincidente con la presión de fluencia determinada en el ensayo edométrico. Debido a la presencia de este pico, la variación del módulo de elasticidad máximo con la presión de confinamiento debe ser modelada mediante dos ecuaciones de tipo potencial: a) una para presiones inferiores a la presión de colapso y b) otra para presiones mayores. A su vez, el efecto de la cementación real y la aparente generadas

por las fuerzas capilares de succión, deben ser tenidos en cuenta en la modelación de G_{max} mediante la adición de un término independiente en los modelos potenciales clásicos (ver ecuaciones 2).

- En el comportamiento a bajas deformaciones del loess, se distinguen dos zonas diferenciadas del comportamiento: a) una zona a bajas tensiones, en la que el módulo de elasticidad máximo es controlado fundamentalmente por el tipo y grado de cementación y b) una zona a elevados confinamientos, en la que el módulo de deformación es principalmente dependiente del contenido de humedad y la succión.
- A grandes deformaciones, los suelos cementados presentan un comportamiento frágil, fundamentalmente a bajos confinamientos. A confinamientos elevados, la fragilidad generada por la cementación disminuye como consecuencia de la rotura sufrida por los vínculos cementantes al soportar el confinamiento. La fragilidad se pierde con el remoldeo y la consecuente desestructuración.
- El loess inalterado muestra una presión de fluencia o colapso claramente identificable, que separa dos tramos rectos del comportamiento tensión - deformación. Este comportamiento justifica el empleo de un modelo de tipo bilineal antes que un hiperbólico para aproximar el comportamiento a grandes deformaciones. Al remoldear y desestructurar al material, la presión de fluencia deja de ser tan marcada y el comportamiento tensión - deformación se aproxima más al hiperbólico.
- En la envolvente de falla de Mohr Coulomb, la cementación del loess natural se traduce en la existencia de un valor de cohesión verdadera para una presión de confinamiento igual a cero. Al remoldear el suelo y perder la cementación, la cohesión desaparece.
- Para muestras ensayadas en condición no saturada, las envolventes de falla correspondientes al loess natural y remoldeado resultan similares, mostrando cohesión en ambas condiciones. En este caso, las fuerzas de succión son las responsables de la cohesión desarrollada por las probetas.
-

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Agencia Córdoba Ciencia y al CONICET por el apoyo económico que hizo factible la concreción de este artículo.

REFERENCIAS

- Airey, D. W. y Fahey, M.. Cyclic Response of Calcareous Soil from the North-West Shelf of Australia. *Geotechnique*, 41, Vol. 1, pp. 101 - 121, 1991.
- Alarcon - Guzman, A., Chameau, J. L., Leonards, G. A., y Frost, J. D.. Shear Modulus and Cyclic Undrained Behavior of Sands. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 29, No. 4, pp. 105 - 119, 1989.
- Alonso, E. E. y Gens, A. Keynote lecture: On the Mechanical Behaviour of Arid Soils. *Proceedings of the First International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, London, U.K., P. G. Fookes & R. H. G. Parry (eds.), pp. 173 - 205, 1994.
- ASTM Standard D4644. Standard Test Methods for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 880 - 882, 1991.

- ASTM Standard D4647. Standard Test Methods for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 890 - 899, 1991.
- Baig, S., Picornell, M. y Nazarian, S.. Low Strain Shear Moduli of Cemented Sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 540 - 545, 1997.
- Brinkgreve, R. B. J. y Vermeer, P. A.. PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analysis. *Material Models Manual*. ISBN 905410449X, Balkema, Róterdam, 1998.
- Capdevila, J. y Rinaldi, V.. Influencia de las Heterogeneidades en el Comportamiento de Suelos Cementados. *Memorias del XVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (SINERGIA 2004)*, Córdoba, Argentina, 2004.
- Clariá, J. J. y Rinaldi, V. A.. Velocidad de Onda en Loess Compactado e Inalterado en Estado de Compresión Confinada. *Memorias del XV Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería en Fundaciones (GEOBA 2000)*, Buenos Aires, Argentina, 2000.
- Cho, G. C. y Santamarina, J. C.. Unsaturated Particulate Materials - Particle Level Studies. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 1, pp. 84 - 96, 2001.
- Drnevich, V. P. y Richart, F. E. Jr.. Dynamic Prestraining of Dry Sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM 2, pp. 453 - 469, 1970.
- Duncan, J. M. y Chang, C. Y.. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM5, pp. 1629 - 1653, 1970.
- Duncan, J. M., Byrne, P., Wong, K. y Marby, P.. Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses. *Report College of Engineering*, University of California, Berkeley, California, 1980.
- Feda, J.. Collapse of Soil Structure. *Proceedings of the First International Symposium on Engineering Characteristics of Arid Soils*, P. G. Fookes & R. H. G. Parry (eds.), London U.K., Balkema, Rotterdam, pp. 237 - 240, 1994.
- Fernández, A. y Santamarina, J. C.. The Effect of Cementation on the Small Strain Parameters of Sands. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, pp. 191 - 199, 2001.
- Hardin, B. O. y Richart, F. E. Jr.. Elastic Wave Velocities in Granular Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 89, No. SM 1, pp. 33 - 65, 1963.
- Hardin, B. O. y Black, W. L.. Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 94, No. SM 2, pp. 353 - 369, 1968.
- Houston, S. L., Walsh, K. D. y Houston W. N.. Shear Strength Contribution of Soil Suction in Cemented Soils. *Anais do 3º Simposio Brasileiro do Solos Não Saturados*, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 1, pp. 25 - 34, 1997.
- Leroueil, S. y Hight, D. W.. Behavior and Properties of Natural Soils and Soft Rocks. In *Characteristics and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan et al. (eds.), Vol. 1, pp. 29 - 254, 2003.
- Redolfi, E.. Comportamiento de Pilotes en Suelos Colapsibles. *Tesis Doctoral presentada en la Universidad Politécnica de Madrid*, Madrid, España, 1990.
- Rinaldi, V. A.. Propiedades Dieléctricas del Loess del Centro de Argentina. *Tesis Doctoral presentada en la Universidad Nacional de Córdoba*, Córdoba, Argentina, 1994.
- Rinaldi, V. A. y Clariá, J. J.. Low Strain Dynamic Behavior of a Collapsible Soil. *Memorias del XI Congreso Panamericano sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Foz de Iguazú, Brasil, 1999.

- Rinaldi, V. A. y Capdevila, J.. Effect of Cement and Saturation on the Stress-Strain Behavior of a Silty Clay. *Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils*, Carefree, Arizona, USA., pp. 1157 - 1168, 2006.
- Rinaldi, V. A., Clariá, J. J. y Santamarina, J. C.. The Small-Strain Shear Modulus (G_{max}) of Argentinean Loess. *Proceedings of the XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Estambul, Turquía, Vol. 1, pp. 495 - 499, 2001.
- Rinaldi, V. A., Rocca, R. J. y Zeballos, M. E.. Geotechnical Characterization and Behaviour of Argentinean Collapsible Loess. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Tan et al. (eds.), Vol. 4, pp. 2259 - 2286, 2006.
- Saxena, S. K. y Lastrico, R. M.. Static Properties of Lightly Cemented Sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE. Vol. 104, No. 12, pp. 1449 - 1464, 1978.
- Seed, H. B. e Idriss, I. M.. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. *Earthquake Engineering Research Center*, Report No. EERC, pp. 70 - 10, 1970.
- Shibuya, S., Hwang, S. C. y Mitahci, T.. Elastic Shear Modulus of Soft Clays from Shear Wave Velocity Measurement. *Geotechnique*, 47, No. 3, pp. 593 - 601, 1997.
- Vatsala, A., Nova, R. y Srinivasa Murthy, B. R.. Elastoplastic Model for Cemented Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, Vol. 127, No. 8, pp. 679 - 687, 2001.
- Walsh, K. D.. Shear Strength Components Attributable to Cementation Versus Soil Suction in Arid Enviroments. *Unsaturated Soil Engineering Practice*, Geotechnical Special Publication No. 60, ASCE. Houston and Fredlund (eds.), pp. 169 - 197, 1997.