Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

SUELOS CEMENTADOS TIPO TOSCA

AUGUSTO ABDALA
ing.augustoabdala@gmail.com

RESUMEN: Este documento reúne información general de suelos cementados con intención de dar una introducción a la caracterización de los mismos, además de brindar información con respecto a su formación, ubicación geográfica y comportamiento geotécnico. Si bien regionalmente existen suelos cementados con designaciones particulares, como la Tosca en Argentina, en el resto del mundo se encuentran formaciones de similares propiedades y con diversas denominaciones: calcrete, hardpan, caliche, dorbank, carenite, gatch, chalk; donde conceptos generales de la cementación y su influencia en el comportamiento mecánico son aplicables.
Se ahondará en la bibliografía disponible para poder comprender diferencias y similitudes entre los distintos tipos de suelos condicionados por ligantes entre sus partículas tomando como punto de referencia los suelos tipo tosca (cementación con carbonatos).

Palabras clave: cementación, tosca, carbonato

CONTENIDO

1. TOSCA EN ARGENTINA 3
2. COMPOSICIÓN y GÉNESIS 4
2.1. Tosca, Cementación por Carbonatos 4
2.2. Influencia del Agua 4
2.4. Proceso de Disolución 4
2.5. Proceso de Cementación 4
3. COMPORTAMIENTO DE SUELOS CEMENTADOS BAJO ENSAYOS TRIAXIALES 6
3.1. Arenas Carbonáticas 6
3.1. Introducción 6
3.1 Introducción: Comportamiento del Suelo sin Cementante 7
3.2 Introducción: Comportamiento del Suelo con Cementante 7
3.3 Dificultades en la Comparación entre Suelo con y sin cementante 7
3.4 Comportamiento de Suelo sin Cementante 8
Confinamiento Isotrópico y Compresión Unidimensional 8
Falla en Estado Crítico 8
3.4 Comportamiento del Suelo Artificialmente Cementado 9
Confinamiento Isotrópico y Compresión Unidimensional 9
Falla en Estado Crítico 10
Comportamiento durante el Corte 10
6. CONCLUSIONES 11
7. REFERENCIAS 13

1. TOSCA EN ARGENTINA

En climas semiáridos, se dan las condiciones propicias para la formación de suelos con acumulaciones calcáreas más o menos endurecidas. En el país, estas acumulaciones existen en la región meridional pampeana presentando diferentes espesores, desde pocos centímetros a más de tres metros, las cuales cubren materiales de diferentes orígenes, como cantos rodados, sedimentos arenosos, etc [1].

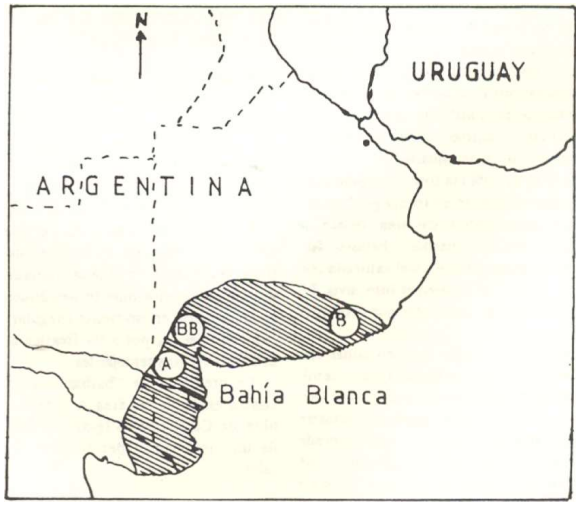


Figura 1 – Distribución aproximada de tosca en Bs.As según Kilmurray - 1966 (A: Algarrobo, BB: Bahía Blanca, B: Balcarce)

Localmente este tipo de suelos tiene el nombre de Tosca, un suelo cementado situado a una profundidad variable, generalmente a unos dos metros por debajo de la superficie. El mismo yace en forma de estratos tipo lámina de carácter relativamente impermeable que consisten básicamente en arenas de cuarzo cementadas predominantemente por carbonatos (calcita y/o dolomita).

Como se muestra en la figura 2, pueden existir múltiples capas de estos materiales en un mismo lugar. En la figura, calcrete es la denominación local de otros países para suelos de propiedades similares [2].

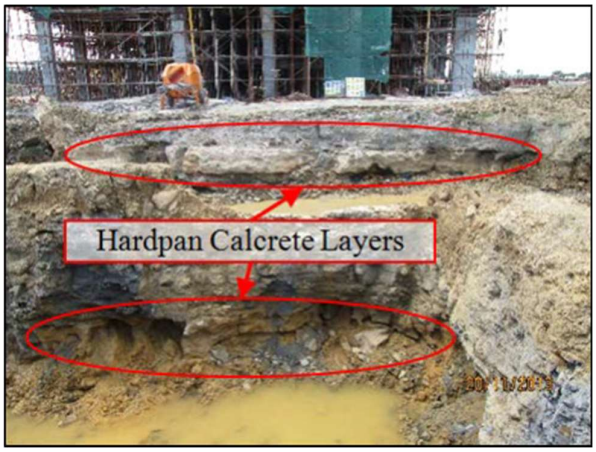


Figura 2 – Múltiples capas de calcreto duro, Nyalau, Malaysia.

2. COMPOSICIÓN Y GÉNESIS

La composición de estos suelos puede ser muy variada ya que, en principio, lo que los caracteriza es el tipo de vínculos que dan sostén a su estructura más que sus partículas en sí. Generalmente se trata de suelos residuales, o sea material formado in situ, remanente de procesos de lavado de componentes transformados y meteorizados.

Siguiendo los lineamientos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, para el caso de la tosca se tiene una designación enmarcada de SM a SC.

2.1. Cementación por Carbonatos

Dentro de los procesos generales de la formación de suelos, aparecen principalmente procesos ambientales de origen químico, originados por fenómenos de cementación debido al transporte de carbonatos, producto de la disolución en otras formaciones. El flujo intersticial de agua con conteniendo carbonatos previamente disueltos a partir de otra roca es lo que permite la formación de suelos cementados tipo tosca, y es por lo tanto el parámetro de mayor importancia para explicar el origen de los mismos.

2.2. Influencia del Agua

Es de importancia aclarar que no en todos los tipos de climas pueden ocurrir los fenómenos antes descriptos. Se estima que las costras de tosca se forman en condiciones de precipitación anual no mayor a 600 mm. En climas más tropicales, la acción de grandes lluvias arrastra con ella el carbonato cálcico disminuyendo los niveles de concentración. Por otro extremo, la ausencia de suficiente humedad imposibilita la formación de cementaciones como es el caso de climas desérticos.

2.4. Proceso de Disolución

El efecto combinado de la lluvia, la evaporación y de los cambios en la presión parcial del anhídrido carbónico en los poros, es el escenario que describe condiciones ideales para su formación (Blatt et al., 1972). Las raíces de las plantas desprenden mucho CO_2, así como la descomposición de las mismas, de modo que el aire intersticial llega a tener 15 veces la concentración en CO2 de la atmósfera en zonas radiculares [3].

A pesar de que la disolución es considerada como un fenómeno físico, en el caso de procesos erosivos suele ir acompañada de reacciones químicas, por lo cual queda justificada su inclusión en este grupo. Para el caso de cementaciones con carbonato, la roca caliza (roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO3), generalmente calcita) que es poco soluble en agua pura, al entrar en presencia con anhídrido carbónico, es disuelta lentamente en forma de bicarbonato cálcico [3]:

$$CO_3Ca + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2$$

Son estos iones dispersos en el agua de infiltración los que originan luego los procesos de cementación que forman suelos cementados por carbonatos.

2.5. Proceso de Cementación

Entre los procesos diagenéticos existe un grupo particular en Geotecnia que son los de cementación, en los que se engloban los procesos efectuados a temperatura ordinaria y pequeña profundidad (la zona llamada también de epidiagénesis) que consisten simplemente en la unión de las partículas por la deposición de un cemento.

La cementación involucra el transporte de iones a través de agua subterránea que al precipitar químicamente forman nuevo material cristalino entre granos sedimentarios de suelo infiltrado. Los

nuevos minerales que llenan los poros generan vínculos entre los granos de sedimento originales. En este proceso, la arena se transforma en arenisca y la grava en un conglomerado. La cementación ocurre como parte de la diagénesis o litificación de los sedimentos.

Grandes volúmenes de agua intersticial deben pasar a través de los poros del sedimento para que cristalicen nuevos cementos minerales, por lo que el proceso de formación requiere de millones de años para completar el proceso de cementación.

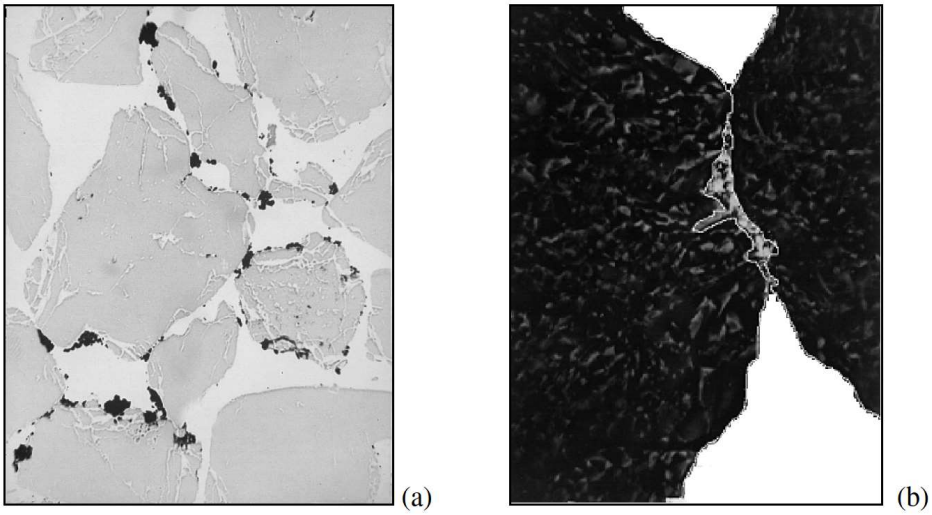


Figura 3 – Imagen microscópica electrónica de una arena cementada: a) Arreglo de granos e incrustaciones cementíceas; b) Detalle de cementación en un contacto [6].

Procesos de Formación Ascendente y Descendente

Como se mencionó anteriormente, este tipo de formaciones se origina en forma de capas, lo cual puede explicarse conforme a las variaciones de niveles freáticos.

En el mecanismo de formación descendente, el agua infiltrada se carga de ácido carbónico y ataca al suelo, dejando una capa pobre en caliza, que pasa a bicarbonato. A mayor profundidad, se encuentra agua menos ácida y la caliza se deposita en forma de concreciones que poco a poco desarrollan en una costra unida.

Otro tipo de mecanismo de formación es el ascendente, el cual se esquematiza en la figura 4. Aquí el nivel freático en cada ascensso a lo largo del tiempo genera nódulos cada vez más grandes con la cementación hasta formar un horizonte. Puede entenderse aquí que la evaporación en superficie aumenta los niveles de concentración hasta un punto donde la cementación es propicia.

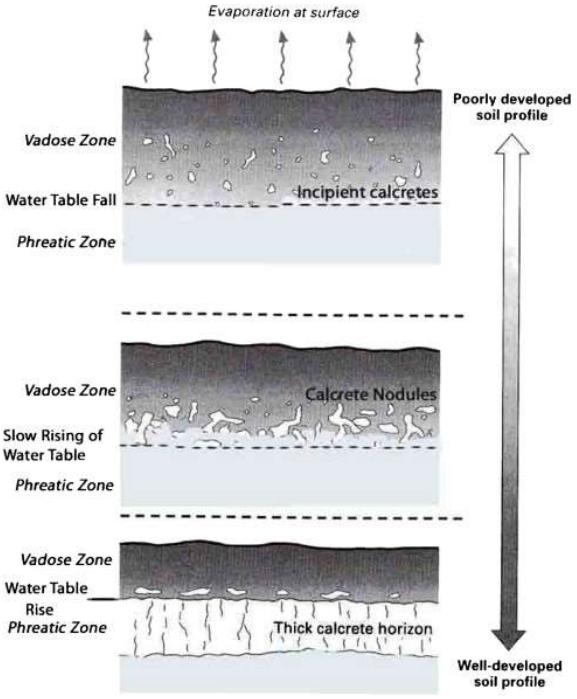


Figura 4 – Mecanismo de formación de calcreto ascendente [4].

3. COMPORTAMIENTO DE SUELOS CEMENTADOS BAJO ENSAYOS TRIAXIALES

Coop y Atkinson (1993) confeccionaron una serie de estudios sobre arenas carbonáticas cementadas con varios de los conceptos generales en torno a los efectos de la cementación, sobre los cuales se remarcan las conclusiones más importantes [5].

3.1. Arenas Carbonáticas

Los depósitos de carbonatos suelen formarse por acumulación de restos esqueléticos de pequeños organismos marinos, lo que se conoce como depósitos bioclásticos, o pueden tener un origen no orgánico, por ejemplo, como resultado de la precipitación química de aguas ricas en carbonatos conocidas como oolitos.

El comportamiento típico de un relleno de arena carbonatada se debe principalmente a la fragilidad y angulosidad de los granos de carbonato. Su elevada relación de vacíos inicial en la masa del relleno tras su deposición, junto con la cementación por carbonatos entre las partículas, caracterizan estos depósitos con:

- Menor resistencia en el ensayo de penetración estándar (SPT) que los encontrados en arenas cuarzosas a niveles de tensión y densidades relativamente comparables.
- Degradación de la distribución granulométrica (aumento del contenido de finos) con la acción de cargas y transporte.
- Mayor compresibilidad que las arenas cuarzosas (a niveles de tensión elevados).
- Mayor ángulo de fricción pico que las arenas de cuarzo.
- Aumento de la resistencia y rigidez de la masa de relleno a lo largo del tiempo tras la deposición del relleno.

En el trabajo descripto, se utiliza arena carbonatada de Dog's Bay de Irlanda, la cual se trata de una arena mal graduada de mala calidad. Es del tipo carbonática biogénica compuesta principalmente por foraminíferos y conchas de moluscos. Con fines de evaluar la influencia de la mineralogía de los finos añadidos por la cementación, se añade pólvora de yeso pasante el tamiz 63 µm aumentando su contenido de finos del 1% al 24%.

3.1. Introducción

Los resultados de ensayos muestran que un efecto importante de la cementación es la reducción del volumen específico (1 + e) resultante del aumento del contenido de finos. Esto influye tanto en el comportamiento tensión-deformación como en la resistencia pico para grandes deformaciones donde se produce la rotura de las uniones del cementante.

La siguiente figura muestra el comportamiento del volumen específico a partir del volumen de vacíos, donde se ve su correspondencia con la relación de vacíos (e = Vv/Vs).

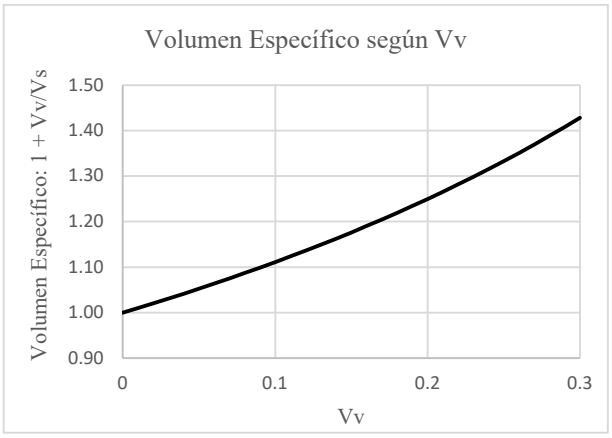


Figura 5 – Comportamiento del volumen específico con respecto al volumen de vacíos

De lo anterior, se concluye que para comparar suelos cementados y no cementados se debe tener en cuenta el efecto de finos sobre la granulometría del suelo y realizar pruebas sobre muestras con igual graduación.

También, es posible identificar para suelos cementados una curva de fluencia que altera las propiedades normales del mismo suelo sin cementante y así definir un marco de comportamiento condicionado por las magnitudes relativas de la presión de confinamiento y de la resistencia del cemento que une las partículas del suelo. La conducta del suelo remodelado (rotura de la unión entre partículas) o sin las fuerzas cementantes, sirve de referencia para explicar la influencia de la cementación en el mismo suelo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en caso de matrices de suelo con partículas más débiles como lo es para arenas carbonatadas, la desestructuración por remodelación mecánica conduce además a la rotura de los granos de suelo.

3.1 Introducción: Comportamiento del Suelo sin Cementante

Las características esenciales del comportamiento de las arenas carbonatadas no cementadas se explican a través de ángulos de fricción y compresibilidades relativamente altos. La angulosidad de las partículas da lugar a elevadas relaciones de vacíos, mientras que su delicada naturaleza provoca grandes cambios de volumen durante la compresión y corte. Tanto Semple (1988) como Coop (1990) han destacado que el comportamiento básico de los sedimentos carbonatados no cementados es comparable al de otros materiales granulares con una relación de vacíos similar.

Coop (1990) Demostró que en la compresión a altas tensiones existe una Línea de Compresión Normal, y que las grandes deformaciones volumétricas plásticas que la originaban eran resultado de la rotura de las partículas. Durante el cizallamiento se encontró que las grandes deformaciones volumétricas plásticas que, de nuevo, eran resultado de la degradación de las partículas, continuaban hasta alcanzar altas deformaciones axiales, lo que dificultaba la definición de los estados críticos. Coop demostró que las líneas de estado crítico sí existen para los suelos carbonatados. Para el suelo particular que probó, eran rectas en el espacio de la tensión deviatórica – tensión normal efectiva (q' ; p'), y eran paralelas a la línea de a la línea de compresión normal en el espacio del volumen específico vs tensión de confinamiento media efectiva logarítmica (v ; ln(p')).

3.2 Introducción: Comportamiento del Suelo con Cementante

Vaughan, Maccarini y Mokhtar (1988) y Leroueil y Vaughan (1990) desarrollaron un marco que define el comportamiento de los suelos cementados. Encontraron que estos materiales pueden alcanzar estados fuera de la línea de compresión normal para el suelo equivalente no cementado o desestructurado, pero niveles de carga más allá del límite de fluencia dan lugar a una compresión relativamente rápida a medida que el estado de compresión se desplaza a la línea de compresión normal del suelo desestructurado.

Bajo compresión isotrópica podían identificarse puntos de fluencia bien definidos, atribuibles a la ruptura de las uniones cementadas (Carter et al. 1988, Airey & Fahey 1991). El efecto principal era una reducción del volumen específico inicial y un aumento de la tensión de fluencia al aumentar el contenido de cemento (Allman & Poulos (1988). Además, Boey & Carter (1988) ensayaron muestras con cementante artificial y encontraron que, para una determinada cantidad de cemento y bajas tensiones de confinamiento, se observaban picos de carga en ensayos a corte por encima de los niveles de suelo sin cementante y que también este efecto disminuía con el incremento del confinamiento.

3.3 Dificultades en la Comparación entre Suelo con y sin cementante

Las comparaciones directas entre el comportamiento de las muestras cementadas y muestras no cementadas se complican por dos factores. En primer lugar, los suelos con cementante tienen un menor contenido de agua que los suelos no cementados al rellenarse los espacios de vacíos el ligante. En segundo lugar, la presencia del cemento puede tener otros efectos en el comportamiento subyacente del suelo, por ejemplo, generar cambios en la graduación.

3.4 Comportamiento de Suelo sin Cementante

Confinamiento Isotrópico y Compresión Unidimensional

El comportamiento a compresión isotrópica de muestras no cementadas de la mezcla de arena y yeso se muestra en la figura 6, donde se ve claramente la reducción de volumen específico tras la adición de finos. También se observa en las muestras con finos añadidos de carbonato cálcico, su aproximación con las muestras con finos de yeso, lo que indica que el cambio de en la graduación en la muestra influye sobre comportamiento del suelo antes que la composición mineral.

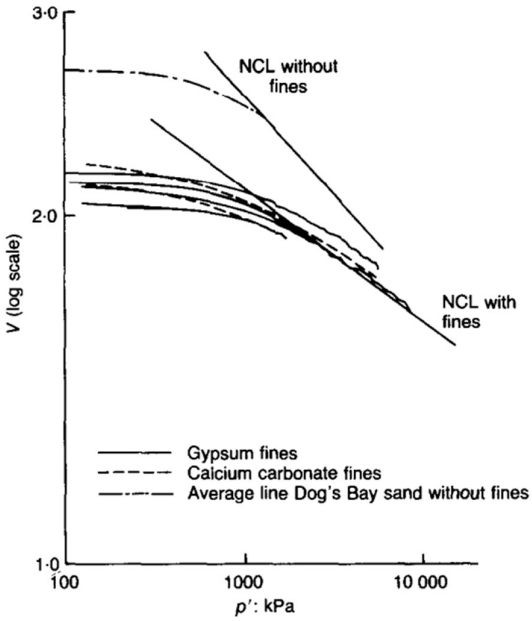


Figura 6 - Compresión isotrópica de muestras con y sin finos

Falla en Estado Crítico

Estados críticos tanto para muestras sin cementar de finos de arenas carbonáticas como de yeso se alinean en una sola recta en la figura 7, demostrando así que la mineralogía del material de relleno no tiene un efecto significante en la fricción del suelo.

En la figura 8 se ven los estados críticos en el espacio ln V: ln p', y los compara con los datos de los ensayos de muestras cementadas de las cuales más adelante se hará mención. Una vez más, los datos de las muestras con finos de yeso y carbonato cálcico son indistinguibles, y puede identificarse una línea de estado crítico paralela a las líneas isotrópica y K0 de compresión.

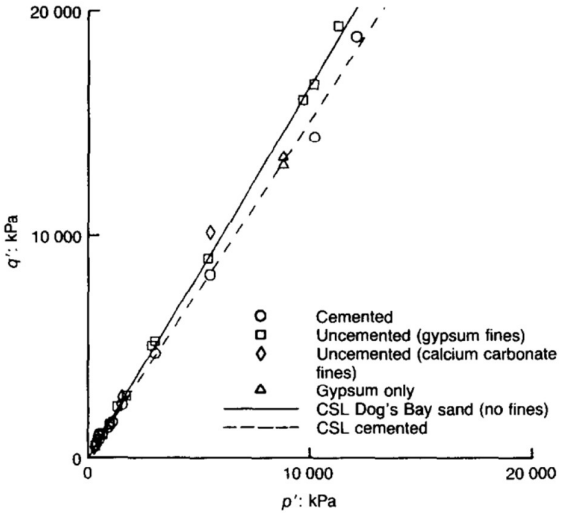


Figura 8 – Falla última de muestras cementadas y no cementadas (q' ; p')

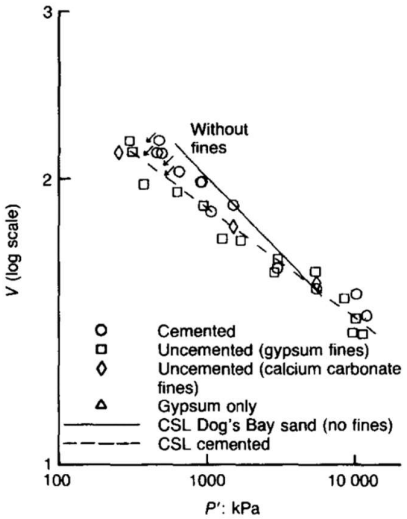


Figura 7 - Falla última de muestras cementadas y no cementadas (logV ; p')

3.4 Comportamiento del Suelo Artificialmente Cementado

Confinamiento Isotrópico y Compresión Unidimensional

De los resultados de compresión isotrópica se observa un claro punto de fluencia en muestras cementadas (ver figura 9). Para suelo sin cementar, el principal mecanismo de deformación volumétrica plástica para estas arenas es la rotura de partículas. En la figura 9 no parece haber puntos de fluencia separados para la rotura del cementante y el inicio de la rotura de los granos. Coop (1990) mostró que la rotura de partículas en suelos sin cementar era un proceso gradual en el que el aumento de la tensión p' daba lugar a una primera línea de carga curva y a una fluencia menos definida (ya que rompen los vínculos en el confinamiento). Para el suelo cementado parece que la matriz de cemento soporta inicialmente la tensión de confinamiento, impidiendo la rotura de las partículas. Luego, cuando la matriz se fractura, la carga recae sobre las partículas individuales, y así el inicio del aplastamiento de las partículas coincide con la cesión de las uniones de cemento.

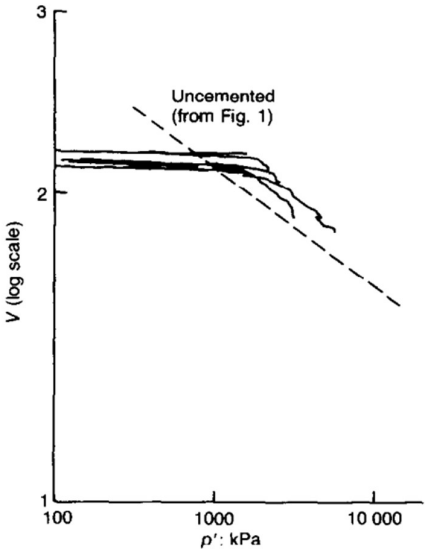


Figura 9 – Compresión Isotrópica de Muestras Cementadas

Es de importancia resaltar que, cargas por encima del límite de fluencia conducen a que el estado del suelo converja con la línea de compresión normal para el suelo desestructurado, pero incluso a las tensiones más altas alcanzadas el volumen específico del suelo inicialmente cementado es significativamente mayor que el del suelo no cementado. Esto último es debido a la gran carga requerida volver a una matriz igual a la no cementada.

En ensayos de compresión unidimensional (figura 10), se ve otra vez al suelo alcanzar estados claramente fuera de la línea de compresión normal del suelo no cementado. Inicialmente la respuesta es extremadamente rígida, y en el espacio q' ; p' la trayectoria de la tensión se mueve rápidamente a estados fuera de la línea de estado crítico del suelo no cementado.

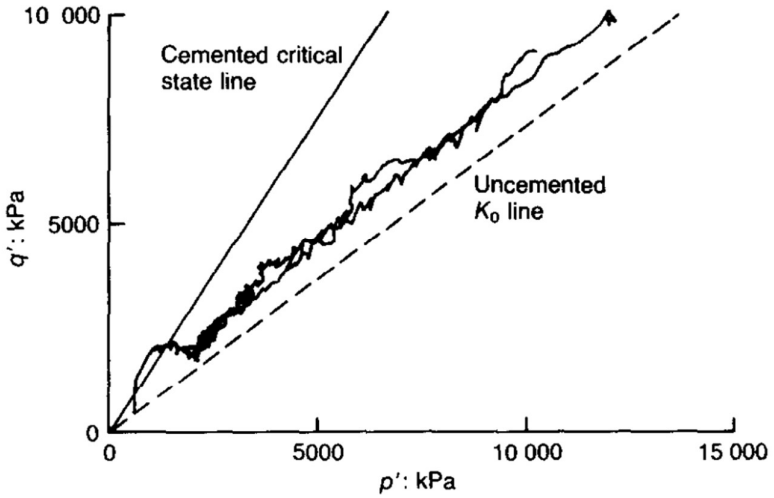


Figura 10 – Compresión de muestras cementadas bajo carga unidimensional

Falla en Estado Crítico

Remitiendo nuevamente a las figuras 7 y 8, excepto por pequeñas diferencias en los valores de ángulo de fricción debido al cemento que aún queda adherido, para los fines ingenieriles se puede considerar una única línea de estado crítico que represente tanto las muestras de arena y yeso.

Comportamiento durante el Corte

En pruebas a altos confinamientos, las trayectorias de tensión mostradas en la figura 12 no tienen picos discernibles, ya que los enlaces cementados cedieron durante la etapa inicial de compresión y parecen tener poca influencia durante el cizallamiento. A tensiones más bajas, los suelos carbonáticos no cementados alcanzan estados máximos por encima de la línea de estado crítico como resultado de la dilatación, tal y como muestra Coop (1990), pero la cementación da lugar a picos de corte aún mayores.

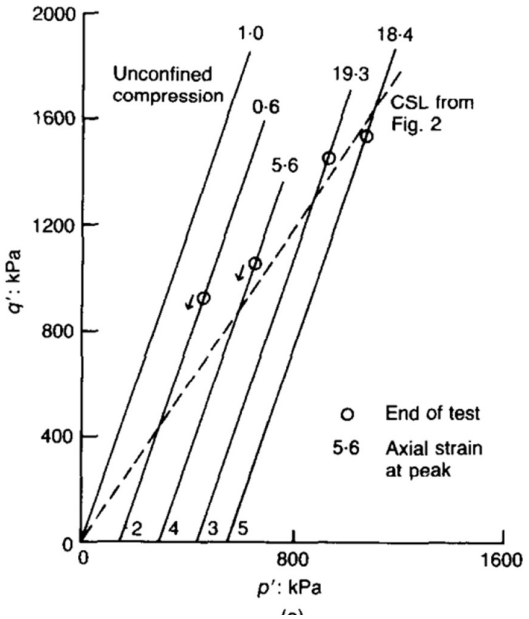


Figura 11 - Trayectorias de tensiones para ensayos sobre muestras artificialmente cementadas (bajo confinamiento)

Para los suelos cementados los picos de respuesta no corresponden a los máximos por dilatación, como es en el caso de los suelos no cementados. A bajas tensiones de confinamiento, la mayor parte de la resistencia máxima se debe a la componente cohesiva del cementante, pero como se ha comentado anteriormente, a tensiones más altas el suelo se vuelve puramente friccional. Este cambio en el comportamiento de corte se ilustra en la 11, donde los ensayos de compresión no confinada se representan una línea media para siete ensayos.

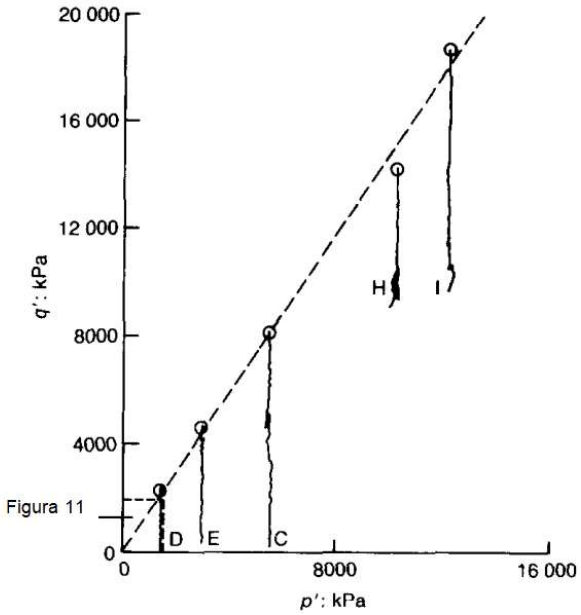


Figura 12 - Trayectorias de tensiones para ensayos sobre muestras artificialmente cementadas con alto confinamiento

A medida que aumenta la tensión de confinamiento, disminuye la relación entre la resistencia máxima y la resistencia en estado crítico, y la deformación axial en el pico aumenta sustancialmente, lo que corresponde a una transición del fallo en el plano de cizallamiento al modo de barril.

En ensayos donde no se apreció fluencia durante la compresión, el comportamiento tensión-deformación inicial puede tomarse como elástico e identificar puntos de fluencia que pueden corresponder al inicio de la rotura de los de las uniones cementadas.

Ya Leroueil & Vaughan (1990) han destacado para el caso de rocas débiles, que el comportamiento tensión-deformación dependerá de la posición del estado inicial del suelo con respecto al lugar de fluencia de la adherencia, como se muestra en la Fig. 14.

Se pueden distinguir tres comportamientos diferentes según el estado inicial. La primera clase se produce cuando la muestra ha superado su límite elástico durante la compresión isotrópica; el cizallamiento posterior debería producir un comportamiento similar al de un suelo no cementado, sin límite elástico. La segunda clase de comportamiento se produce a tensiones de confinamiento intermedias, de modo que, aunque las uniones cementadas están intactas al inicio del ensayo, ceden durante el corte y el estado último se rige por el comportamiento friccional del suelo con las uniones de cemento destruidas. La curva de tensión-deformación para este tipo de ensayo muestra un punto de fluencia distinto después de una sección elástica inicial (figura 13). Para la tercera clase, la muestra se corta a bajas tensiones de confinamiento en relación con la resistencia de la cementación y se produce un pico de estado a bajas deformaciones bien fuera de la superficie límite de estado del suelo no cementado.

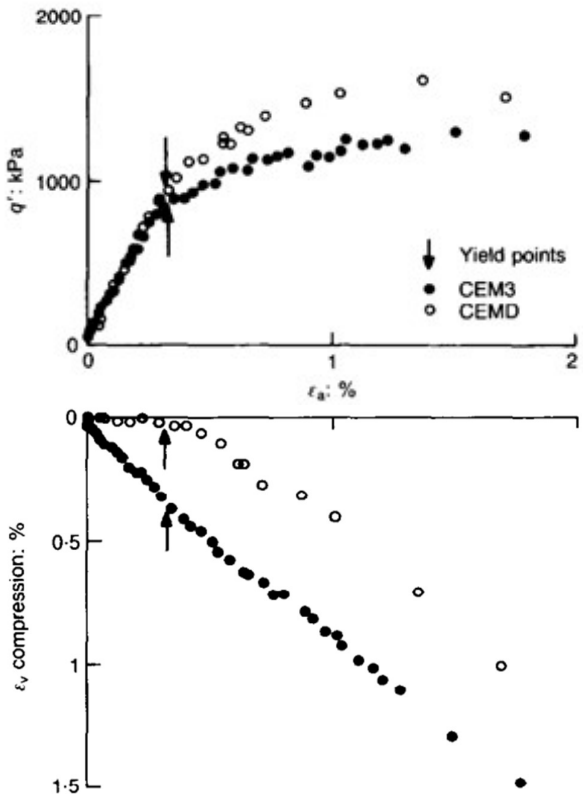


Figura 13 – Identificación de puntos de fluencia para muestras cementadas: CEM3: p' = 1500 kPa, CEMD: p' = 450 kPa (p' constante)

6. CONCLUSIONES

Los orígenes de la cementación pueden ser variados como también el comportamiento final del suelo cementado, dando lugar a una gran diversidad de este tipo materiales globalmente. Existen muchas variables que controlan la respuesta de estos suelos, siendo el porcentaje y la resistencia del ligante en la los más destacables. Aún así, se pueden dictar conceptos generales que permiten enmarcar teóricamente el comportamiento de los mismos.

Los principales efectos de la cementación se pueden resumir en una reducción del volumen específico mediante la adición de cementante en los espacios vacíos además de la existencia de puntos de fluencia bien definidos en las respuestas de tensión-deformación bajo compresión y corte. La fluencia es asociada con la rotura de los enlaces del cemento y, para suelos débiles como los carbonáticos, también con el inicio de la fractura de las partículas.

Existen dos consecuencias debido a la reducción de volumen específico por la cementación. En primer lugar, con el fin de comparar el comportamiento del material cementado y no cementado, es necesario contar con una graduación similar en ambos conjuntos de muestras. En segundo lugar, el comportamiento del suelo se ve alejado de la línea de compresión normal, donde la cementación contribuye a una mayor resistencia pico en función del confinamiento.

La cementación tiene influencia en la resistencia solo a pequeñas presiones de confinamiento, efecto relativo a la fuerza de adherencia de las uniones entre partículas.

Para muestras cementadas es posible identificar puntos de fluencia que pueden ocurrir en compresión o en corte. Si además se conoce el comportamiento del material no cementado o desestructurado, se pueden observar clases de comportamiento como las indicadas en la Fig. 14. La curva de fluencia generada es controlada tanto por la calidad como la cantidad del cementante.

A bajas tensiones de confinamiento, el corte puede provocar la fluencia a resistencias superiores a la envolvente de fallo por fricción del suelo no cementado, y la carga continua conduce a la deformación ablandamiento. A tensiones de confinamiento elevadas, la fluencia se produce durante la compresión, en cuyo caso el comportamiento del suelo es de endurecimiento por deformación y su resistencia es friccional. Los datos también mostran que la transición del comportamiento cohesivo al friccional no está bien definida. A niveles de tensión intermedios, se observa que las muestras ceden durante las fases iniciales del cizallamiento. Sus resistencias máximas yacen ligeramente por encima de la envolvente de falla por fricción, lo que indica cierta influencia de la cementación después de la fluencia.

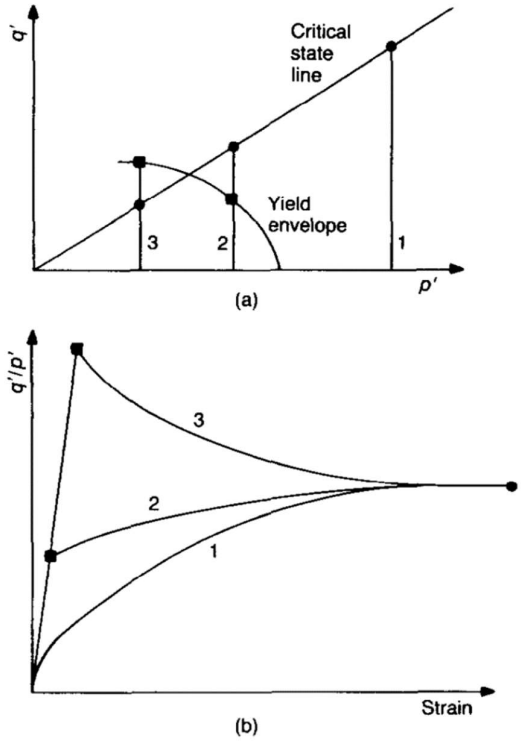


Figura 14 – Comportamiento idealizado de suelos cementados: (a) trayectorias de tensión; (b) comportamiento tensión-deformación

7. REFERENCIAS

[1] Daniel E. Buschiazzo, Estudio sobre la Tosca. Parte I: Evidencias de un Movimiento Descendente del Carbonato en Base a la Interpretación de Características Macro y Geomorfológicas.

[2] Sim, A.C.Y., Ong, D.E.L., Tai, L.Y., Ting, W.H., Chai, E.P.S. & Bachat, J., Characteristics of Hardpan Calcrete of the Nyalau Formation and Impact on Design of Foundations

[3] R. Moussavi-Haramia, A. Mahboubi, M. Nadjafi, R. L. Brenner, M. Mortazavi, Mechanism of Calcrete Formation in the Lower Cretaceous (Neocomian) Fluvial Deposits, Northeastern Iran based on Petrographic, Geochemical Data.

[4] Geotecnia y Cimientos I: Propiedades de los Suelos y de las Rocas, Jiménez Salas.

[5] Coop, M. R. & Atkinson, J. H., Géotechnique 43, No. 1, p 53-63 - The Mechanics of Cemented Carbonate Sands (1933).

[6] J. P. Ibañez, Modelación micromecánica de suelos granulares incluyendo el fenómeno de cementación de partículas.

[7] Cuccovillo, T. & Coop, M.R., Yielding and pre-failure deformations of structured sands. Géotecnique, V. 47, No. 3, 1997, pp 491-508.