SUELOS CEMENTADOS

Maestría en Ingeniería Geotécnica

Comportamiento Mecánico de Suelos

Edgardo Javier Cicchinelli

1. Introducción.

Los suelos cementados son principalmente suelos granulares cuyas partículas se encuentran unidas mediante un agente aglomerante o cementante. Este proceso genera una nueva estructura con propiedades mecánicas distintas a las propias del suelo granular no cementado.

La clasificación de los suelos cementados se basa en tres criterios principales: la composición mineral del agente cementante, el proceso de formación y el volumen de cemento presente en el espacio poroso.

El proceso de formación de los suelos cementados se observa comúnmente en regiones donde el nivel freático varía de manera continua. Estas condiciones provocan ciclos alternados de saturación y secado en los estratos del suelo, lo que favorece la disolución de sales y otros minerales. Estos, a través de reacciones químicas, forman los agentes cementantes que unen las partículas del suelo, consolidando su estructura.

2. Clasificación de suelos cementados.

La clasificación de los suelos cementados es fundamental para entender el comportamiento mecánico y la respuesta ante cargas. Por ello, los clasificaremos en función de las características principales como la composición del cementante, grados de cementación en el proceso geológico y la cantidad relativa de cemento presente en el espacio poroso. Esta clasificación permite diferenciar los diversos tipos de suelos que podemos encontrar.

2.1. Clasificación por el grado de cementación

- Cementación baja: Corresponde a suelos donde la resistencia proporcionada por el agente cementante es limitada. Estos suelos suelen ser relativamente jóvenes y muestran una cohesión débil entre sus partículas.

- Cementación alta: el agente cementante proporciona una resistencia significativamente mayor, fruto de un proceso de formación prolongado en el tiempo. Este tipo de suelos frecuentemente se clasifica como rocas blandas debido a su comportamiento mecánico intermedio entre un suelo y una roca.

2.2. Clasificación del tipo de cemento

El cemento, como componente secundario de los suelos cementados, se precipita a partir del agua contenida en los poros del suelo. La identificación precisa de su origen puede resultar compleja debido a la variabilidad en los procesos de formación.
Los agentes cementantes suelen ubicarse alrededor de las partículas del suelo, en los puntos de contacto entre ellas o precipitados dentro del espacio poroso. En algunos casos, pueden formar nódulos que conducen a suelos parcialmente litificados o incluso a rocas blandas.

Entre los principales cementantes que actúan, ya sea de manera individual o en combinación, destacan:

- Carbonatos de calcio
- Sílice
- Óxidos de hierro
- Cuarzo
- Feldespato

La acumulación de carbonato de calcio, en particular, es un rasgo distintivo de las regiones áridas y semiáridas. Es importante señalar que, en ambientes desérticos con muy poca disponibilidad de agua, el carbonato se acumula superficialmente. En contraste, en zonas con excesiva agua o relieve elevado, las sales tienden a disolverse, limitando la cementación a niveles más profundos o restringiéndola por completo.

2.3. Clasificación por volumen de poros

La clasificación según el volumen de cemento presente en los poros y su desarrollo permite agruparlos en cuatro categorías principales

- Los cementos con relleno de poros (pore-filling), llenan los espacios entre los clastos, por arcillas o cementos carbonatados. Este tipo de cemento se forma generalmente en la zona freática profunda (zonas saturadas) con muy baja circulación de agua.

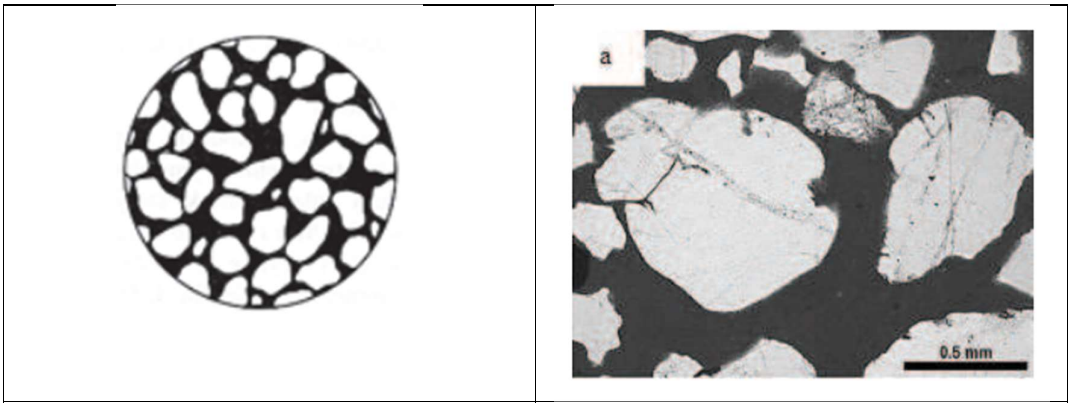


Figura 1: Ejemplo de partículas de Quarzo con un relleno completo de poros por un agente cementante

- Los cementos de menisco (grain-coating) cubren los clastos como una película delgada, dejando una parte considerable de los poros vacíos.

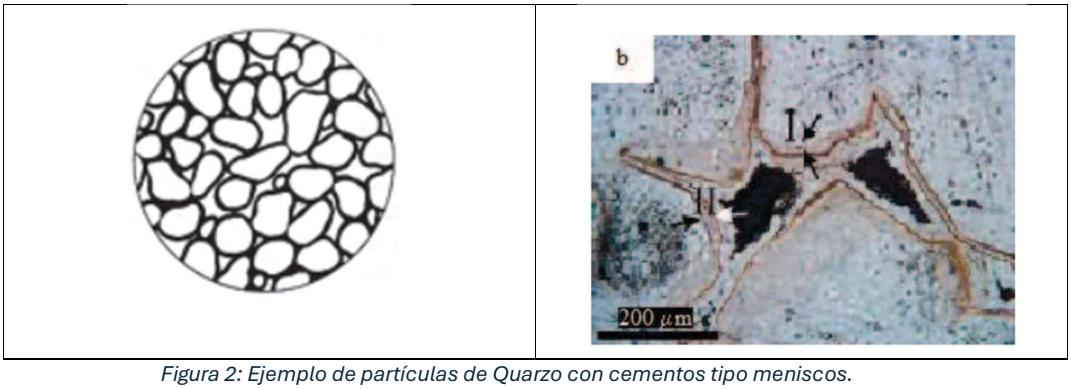


Figura 2: Ejemplo de partículas de Quarzo con cementos tipo meniscos.

- Los cementos del tipo contacto, la precipitación o recristalización de minerales, que ocurre solo en los puntos de contacto de los granos que sirven como núcleos, crea cementos de contacto. El cemento de contacto es característico de sedimentos débilmente cementados.

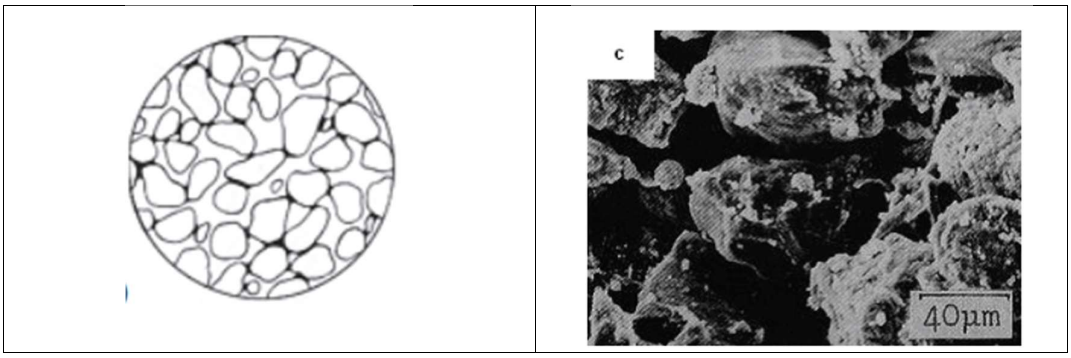


Figura 3: Ejemplo de partículas de arena cementados con arcillas.

- Los cementos de relleno completan los poros con nuevos precipitados sobre cementos más antiguos. Los cementos de llenado de poros y los cementos de relleno son típicos de sedimentos litificados y bien cementados, como areniscas, limolitas, arcillolitas, lutitas y rocas de hierro.

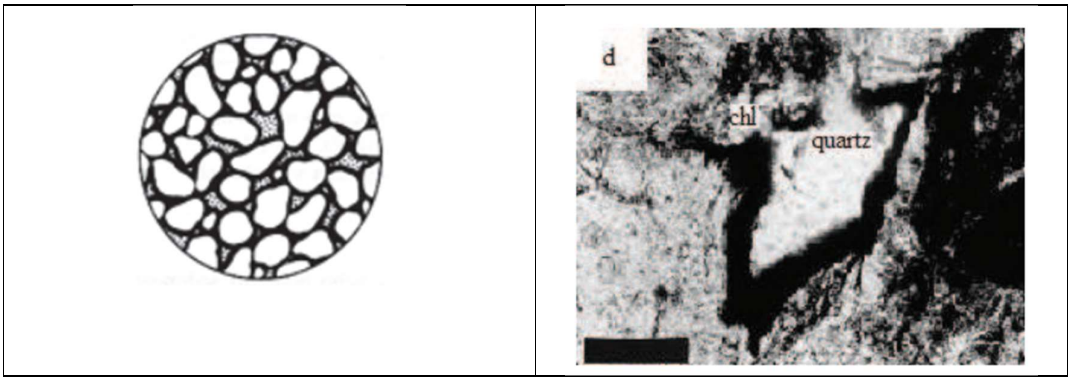


Figura 4: Granos de cuarzo cementado por clorita y luego recubierto por aceite

2.4. Tipos de suelos cementados en la Argentina

En la región del país se encuentran diversos suelos que presentan las características propias de los suelos cementados. Algunos ejemplos destacados incluyen:

- Loess pampeano: ubicado en las regiones de la Pampa Húmeda y otras áreas del centro del país. El limo en estado natural presenta cementación debido a la presencia de carbonato de calcio que actúa como agente cohesivo entre las partículas de limo y arena. Estos suelos tienen alta porosidad y, aunque son relativamente estables en su estado seco, pueden colapsar al saturarse.

- Suelos calcáreos (caliche o tosca): ubicados en regiones áridas y semiáridas del oeste y norte del país, como Mendoza, San Juan y Salta. Contienen altas concentraciones de carbonato de calcio que se precipita con el tiempo, formando capas endurecidas. Estos suelos tienen buena resistencia y son comunes en zonas con baja pluviometría.

- Suelos lateríticos: ubicados en regiones subtropicales del noreste, como Misiones y Corrientes. La meteorización intensa y prolongada de la roca madre disuelve los minerales de la roca primaria. Los procesos de lixiviación intensos concentran óxidos de hierro y aluminio, que cementan las partículas del suelo.

- Sedimentos fluviales cementados: Ubicados en áreas del noroeste argentino, como Tucumán, Jujuy y Salta, donde los depósitos fluviales o aluviales antiguos (suelos sedimentarios) están parcialmente cementados. Contienen partículas arenosas o arcillosas unidas por cementos naturales, como carbonatos o sílice.

3. Ensayos

3.1. Determinación de la presencia de cementantes

Se mencionan dos métodos que permiten determinar en forma cualitativa si un suelo presenta cementación.

- Slaking Test consiste en secar una muestra y sumergirla en agua durante 24 horas para que luego, evaluar si el material se mantiene firme o se desestructure desmoronándose, pueda inferirse si presenta algún grado de cementación.

- doble ensayo edométrico: 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

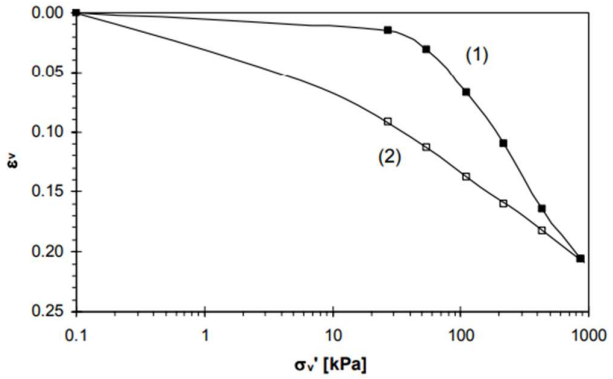


Figura 5: Curvas de compresibilidad para muestras saturadas. (1) Indisturbada y (2) Remoldeada.

3.2. Comportamiento mecánico.

El comportamiento de los suelos cementados está determinado por el tipo de agente cementante y la estructura granular del suelo. Como resultado, se observan diversas respuestas mecánicas, entre las que destacan:

- Aumento de la rigidez frente a bajas deformaciones.
- Aparición de un punto de colapso.
- Incremento del valor de cohesión efectiva.
- Localización de tensiones en áreas específicas.
- Aumento de la resistencia al corte y a la compresión.

Los vínculos cementantes presentan un comportamiento elástico y frágil, lo que implica que, ante un aumento significativo de la deformación, los puentes cementantes colapsan, dando lugar a deformaciones plásticas. Este tipo de comportamiento puede enmascararse en suelos parcialmente saturados, donde las fuerzas capilares producen efectos similares a los generados por los cementantes. Una vez que los vínculos de cemento se rompen, el suelo pierde rigidez y comienza a comportarse como un suelo no cementado, respondiendo según las características de su estructura granular.

La parametrización de estos efectos representa un desafío, ya que es necesario realizar ensayos de laboratorio que abarquen diferentes niveles de deformación para luego integrarlos en modelos numéricos que reproduzcan de manera precisa el comportamiento de este tipo de suelos.

En términos de niveles de cementación, altos valores (60% o más) están asociados con materiales que se describen como rocas, mientras que niveles menores corresponden a suelos cementados con un comportamiento mecánico intermedio entre suelos no cementados y rocas.

3.3. Respuesta a ensayos de corte– suelos cementados naturalmente.

Se muestran curvas típicas de tensión-deformación para tres de las arenas con un grado de cementación alto para muestra SLAC-1, moderado para PAC-2, y muestra de arena débilmente cementada PAC-I, cuyas características son:

Sand identification (1)	Dry unit weight, in kilonewtons per cubic meter (2)	Moisture content, as a percentage (3)	Void ratio (4)	Degree of saturation, as a percentage (5)	D_{50}, in millimeters (6)	Pass 200 sieve, as a percentage (7)
SLAC-1	17.6	10	0.48	56	0.14	18
SLAC-2	16.5	14	0.57	61	0.24	0
PAC-1	16.7	5	0.54	22	0.23	5
PAC-2	17.1	15	0.47	81	0.12	24

Note: 1 kN/m^3 = 6.36 lb/cu ft.

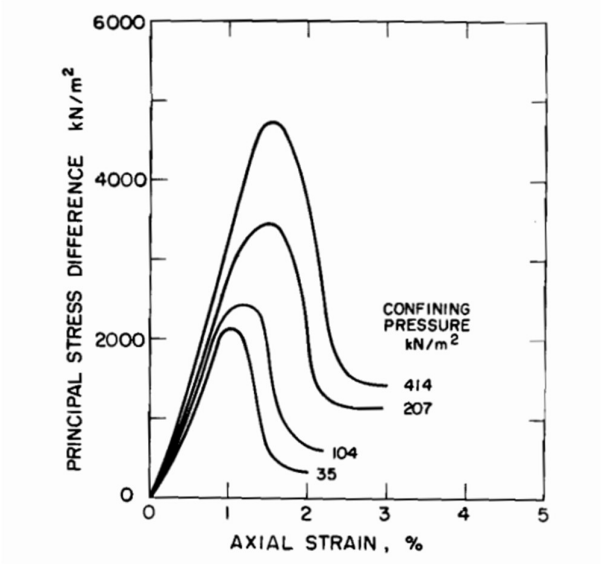


Figura 6: curva tensión deformación, ***arena fuertemente cementada*** *(SLAC-1)*

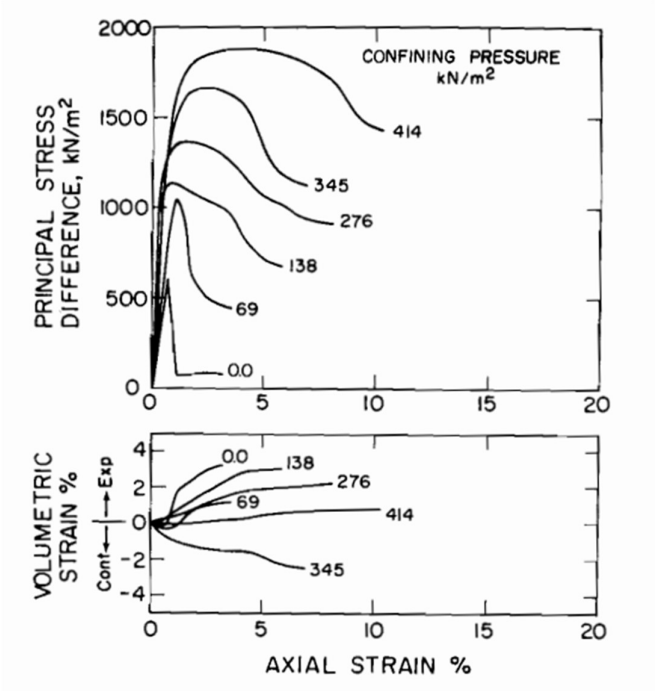


Figura 7: curva tensión deformación, ***arena moderadamente cementada*** *PAC-2*

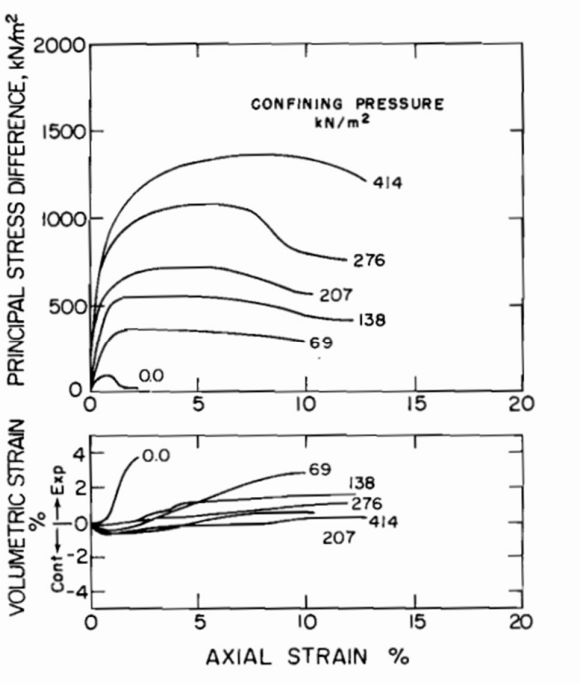


*Figura 8: curva tensión deformación**, arena débilmente cementada** PAC-1*

La característica común de todos los resultados es que la rigidez y la resistencia máxima aumentan con el incremento de la presión de confinamiento.

Los datos de cambio de volumen de los suelos PAC-I y PAC-2 muestran que se produce una fuerte expansión volumétrica en los niveles más bajos de presión de confinamiento.

Este fenómeno disminuye a medida que aumenta la presión de confinamiento, el cambio de volumen tiende a cero durante el ensayo.

Una característica importante mostrada por los datos de tensión-deformación es que la respuesta post-pico es altamente dependiente del grado de cementación y de la presión de confinamiento.

Para suelo más resistente con un grado de cementación alto, SLAC-I, muestra un comportamiento de fallo frágil a todos los niveles de presión de confinamiento.

Para los suelos moderadamente cementados demuestran una respuesta transicional de fallo frágil a dúctil a medida que aumentan las presiones de confinamiento.

La razón de la transición de los modos de fallo frágil a dúctil parece estar relacionada con las contribuciones relativas a la respuesta de la arena por parte de los componentes de cementación y fricción de los mecanismos de resistencia a la deformación.

Se detalla la envolvente de rotura para las tensiones máxima de compresión, obtenidas de las diferentes muestras ensayadas.

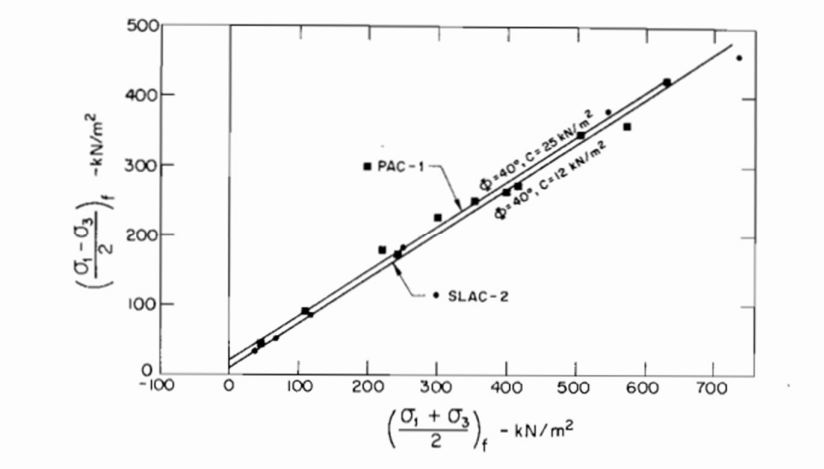


Figura 9: Envolvente de falla para tensiones máxima. ***Arenas con cementación débil.***

Los datos de los dos suelos pueden ajustarse mediante líneas rectas que tienen la misma pendiente, pero se desplazan ligeramente. Las líneas sugieren que ambos suelos tienen una cohesión aparente.

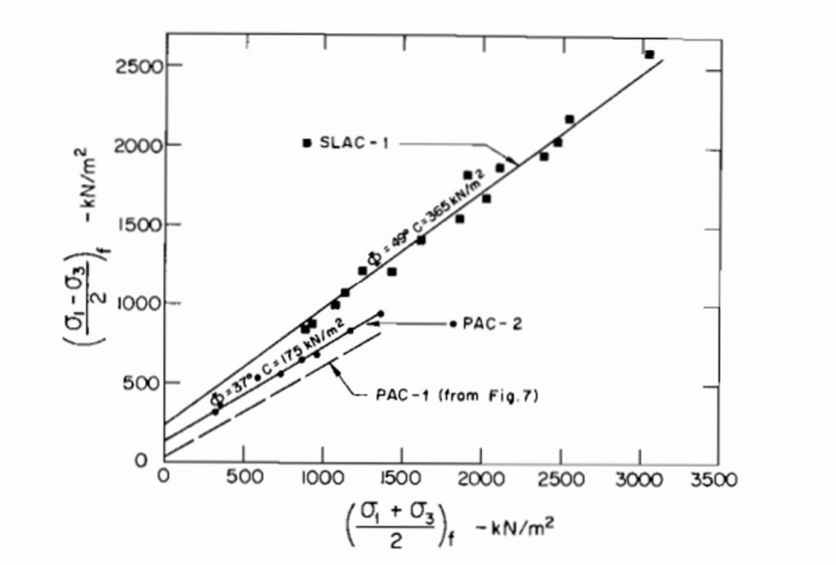


Figura 10: Envolvente de falla para tensiones máxima. ***Arenas con cementación moderada y fuerte***

En este último gráfico, ambos suelos siguen de cerca las líneas rectas, aunque el suelo SLAC-1 es mucho más resistente que el suelo PAC-2. Tanto las arenas SLAC-1 como PAC-2 tienen resistencias muy superiores a las de las arenas PAC-1 y SLAC-2.

3.4. Respuesta a ensayos de corte – suelos cementados artificialmente.

Estudios han comparado el comportamiento de suelos cementados y no cementados para evaluar las diferencias en sus respuestas mecánicas. Algunos autores realizaron investigaciones utilizando suelos cementados de manera artificial, tratados con inyecciones de grout de nanosílica coloidal como agente cementante.

Durante las pruebas, se observó que, al aumentar la deformación axial y la carga aplicada, los enlaces cementantes entre las partículas comenzaron a romperse. Este proceso provocó una disminución progresiva de la rigidez del suelo, influenciada por la presión de confinamiento aplicada. Comparativamente, se evidenció que la cementación redujo de manera significativa los cambios volumétricos en el suelo, en contraste con los especímenes no cementados.

El comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos cementados después de la consolidación isotrópica ha sido clasificado en tres grupos principales:

- Altas presiones de confinamiento: Bajo estas condiciones, los enlaces cementados se rompen durante la consolidación isotrópica, y el suelo presenta un comportamiento similar al de un suelo no cementado durante la etapa de corte.

- Presiones de confinamiento intermedias: En este caso, los enlaces cementantes permanecen intactos al inicio de la etapa de corte. Sin embargo, a medida que avanza la prueba, los enlaces alcanzan su punto de fluencia y comienzan a fallar.

- Bajas presiones de confinamiento: Cuando la presión de consolidación es menor en comparación con la resistencia de los enlaces cementantes, el suelo muestra un comportamiento predominantemente elástico hasta alcanzar el punto de fluencia, que se identifica claramente en las curvas esfuerzo-deformación.

Estos hallazgos subrayan la influencia de la cementación en la respuesta mecánica de los suelos y la importancia de considerar las condiciones de confinamiento al evaluar su comportamiento estructural.

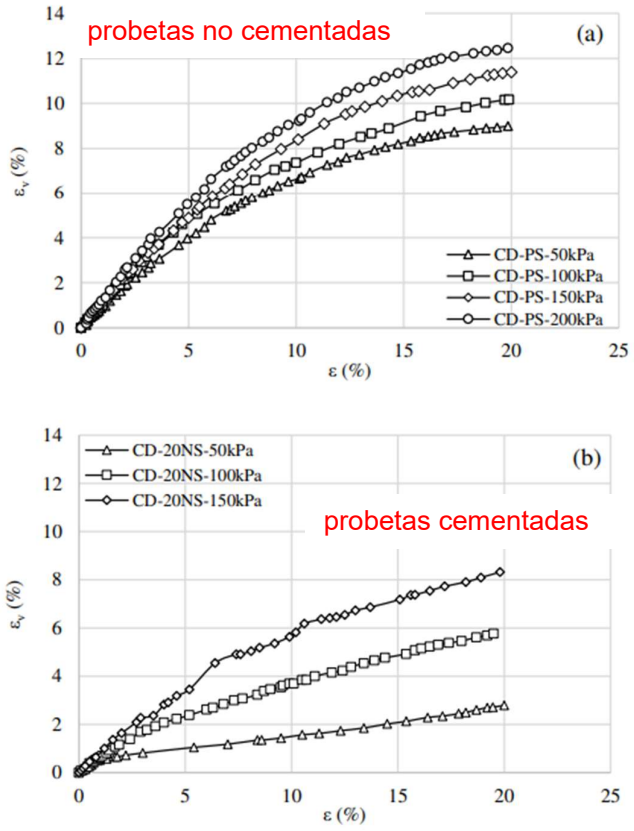


Figura 11: Variación del volumen ante carga axial en ***(a) probetas no cementadas (b) probetas cementas***

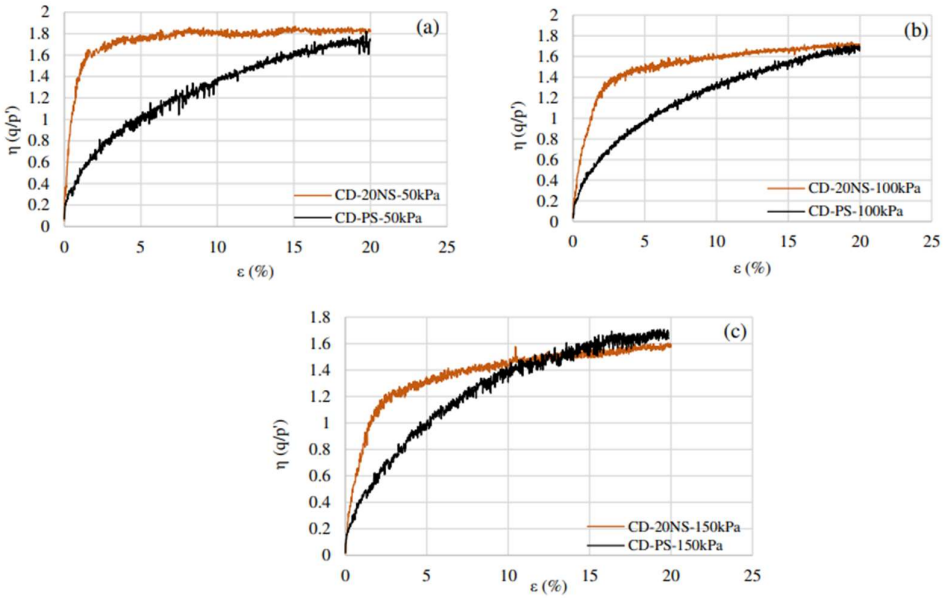


Figura 12: curva tensión deformación ***para probetas cementadas y no cementadas****, sometidas a diferentes confinamientos*

4. Conclusiones

El comportamiento mecánico de los suelos cementados está influenciado tanto por su estructura granular como por el agente cementante. En su estado inicial, la interacción de estos dos mecanismos confiere al material una resistencia mayor.
A bajas deformaciones, los suelos cementados presentan un comportamiento predominantemente elástico y rígido. Sin embargo, al alcanzar el límite de ruptura de la cementación, su respuesta mecánica cambia. En esta etapa, el comportamiento del material depende de su estructura granular friccional, lo que da lugar al desarrollo de grandes deformaciones asociadas a una respuesta no lineal.

Referencias

G. Wayne Clough, M. A. (1981). *Cemented Sans Under Static Loading*.

Maryam Meftahi, P. C. (s.f.). *Experimental and numerical investigation of cemented and non-cemented*.

Trhlíková, M. J. (2013). *Ph.D. THESIS. Mechanical behaviour of cemented fine-grained soils*. Prague.