FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

ARCILLAS EXPANSIBLES: IMPORTANCIAS EN LA OBRA CIVIL

CASCONE, ADRIÁN IGNACIO

aicasconev@gmail.com

RESUMEN

Los suelos expansivos son un problema mundial que plantea diversos desafíos para los ingenieros civiles. Se consideran un peligro natural potencial, ya que pueden causar daños extensos a las estructuras si no se tratan adecuadamente. Estos suelos han provocado graves perjuicios en diversas estructuras de ingeniería civil, especialmente en aquellas de carga ligera, como viviendas, losas, pavimentos de carreteras, revestimientos de canales, entre otras. La identificación temprana y la adecuada gestión de los suelos expansivos son elementales en la construcción moderna, ya que no solo permiten la preservación de la seguridad estructural, sino que también contribuyen a la sostenibilidad y eficiencia de las inversiones en infraestructura. La correcta evaluación técnica y económica de las soluciones para mitigar sus efectos es indispensable para reducir los riesgos y costos asociados a los daños y pérdida de funcionalidad a largo plazo.

Palabras clave: arcillas expansibles, infraestructura, caracterización, mitigación.

Contenido

ARCILLAS EXPANSIBLES: IMPORTANCIAS EN LA OBRA CIVIL 1

1. INTRODUCCIÓN 2
2. DEFINICIÓN 2
3. GENESIS 5
4. EFECTO EXPANSIVO 5
5. caso 6
6. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS 6
7. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN 8
8. INTERRACCIÓN SUELO ESTRUCTURA Y MODELOS CONSTITUTIVOS 9
9. CONCLUSIONES 10
10. REFERENCIAS 10

1. INTRODUCCIÓN

El concepto “Suelo Expansivo” es un término generalmente empleado a cualquier suelo o material rocoso que tiene la capacidad de contraerse e hincharse bajo cambios en las condiciones de humedad. La historia de los suelos expansivos comenzó hace millones de años, durante periodos de volcanismo intenso. La ceniza fue depositada en aguas poco profundas y formó una solidificación de arcilla rica en montmorilonita inestable, el principal mineral de las arcillas expansivas.



Figura 1 - Suelo agrietado superficialmente por efectos del fenómeno expansivo.

El principal problema al que nos enfrentamos con estos suelos, es que la deformación que provocan es superior a la elástica, y no pueden ser previstos por la elasticidad clásica o por la teoría de la plasticidad. Los movimientos provocados por estos suelos tienen comúnmente un patrón irregular como para causar grandes daños a las estructuras y pavimentos que se apoyan sobre estos.



Figura 2 - Pavimento dañado por efecto se suelo expansivo.

2. DEFINICIÓN

Minerales arcillosos

La mayor parte de las partículas de un suelo natural con un tamaño inferior a 2 micrómetros está formada por minerales arcillosos. Estos minerales se originan mediante un proceso de erosión química, y su composición difiere de la de las rocas de las que provienen. La composición química de las arcillas es, por otro lado, altamente variable. Debido a esto, durante mucho tiempo se defendió la tesis de que la arcilla era una mezcla de geles amorfos de sílice y sesquióxidos, sin proporciones fijas. En contraposición, la tesis opuesta sostenía que la arcilla se componía de una mezcla de partículas, cada una perteneciente a una especie química perfectamente definida.

Actualmente, la investigación de las arcillas mediante rayos X ha demostrado que las partículas de arcilla son cristales de especies mineralógicas claramente identificadas. La variabilidad en la composición de las arcillas proviene, en primer lugar, de la mezcla de estas especies y, en segundo lugar, de los fenómenos de adsorción que ocurren en las partículas. Sin embargo, también se ha demostrado que la tesis opuesta era, hasta cierto punto, cierta, ya que hoy no cabe duda de la coexistencia, en la arcilla, de geles amorfos (alofana) junto a las especies cristalinas, lo cual contribuye a la enorme variedad de esta fracción granulométrica del suelo. Estos geles, no obstante, están presentes en pequeñas cantidades y corresponden a una forma transitoria, pues generalmente evolucionan hacia el estado cristalino.

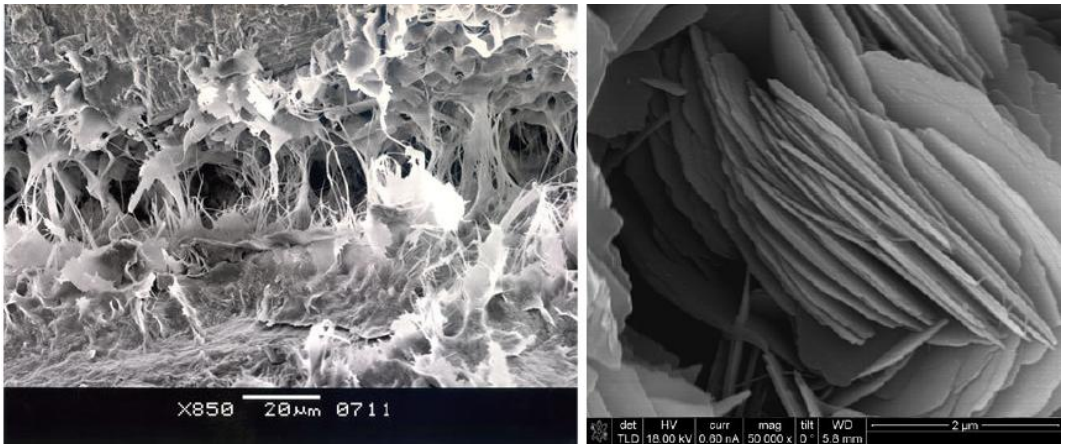


Figura 3 - Imágenes microscópicas de distintos suelos arcillosos, illita (izquierda) y montmorillonita (derecha).

Desde un punto de vista químico, los minerales arcillosos son silicatos de aluminio, hierro, magnesio, etc. Están formados por la combinación de dos elementos fundamentales El primero es un **tetraedro**, en el que cuatro átomos de oxígeno rodean a un átomo de silicio. Los tetraedros forman capas, de modo que los oxígenos de las bases de todos ellos se encuentren en el mismo plano, y cada oxígeno pertenezca a dos tetraedros.

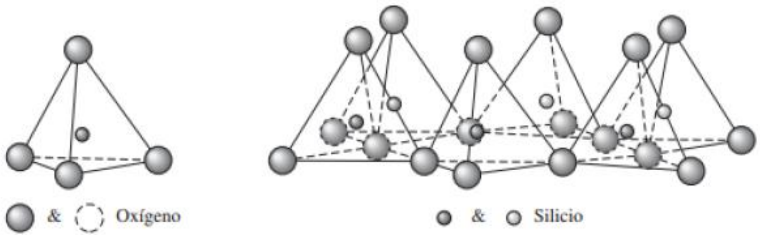


Figura 4 - Tetraedro de Sílice.

El segundo elemento es un **octaedro** en el que un átomo de aluminio, hierro, magnesio, etc., está rodeado por seis átomos de oxígeno. Los octaedros forman también capas.

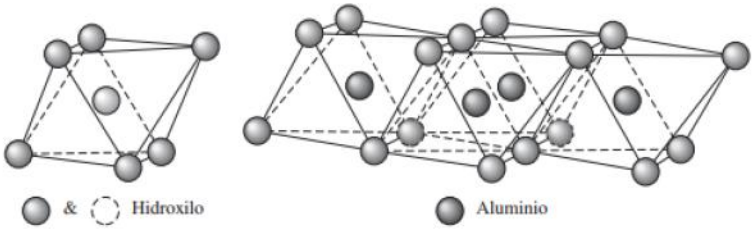


Figura 5 - Octaedro de Alúmina.

De las distintas combinaciones de estas dos capas, y de los distintos cationes o aniones que las forman, resulta la gran variedad de los minerales arcillosos cristalinos. La Tabla 1 nos muestra la clasificación de los más importantes.

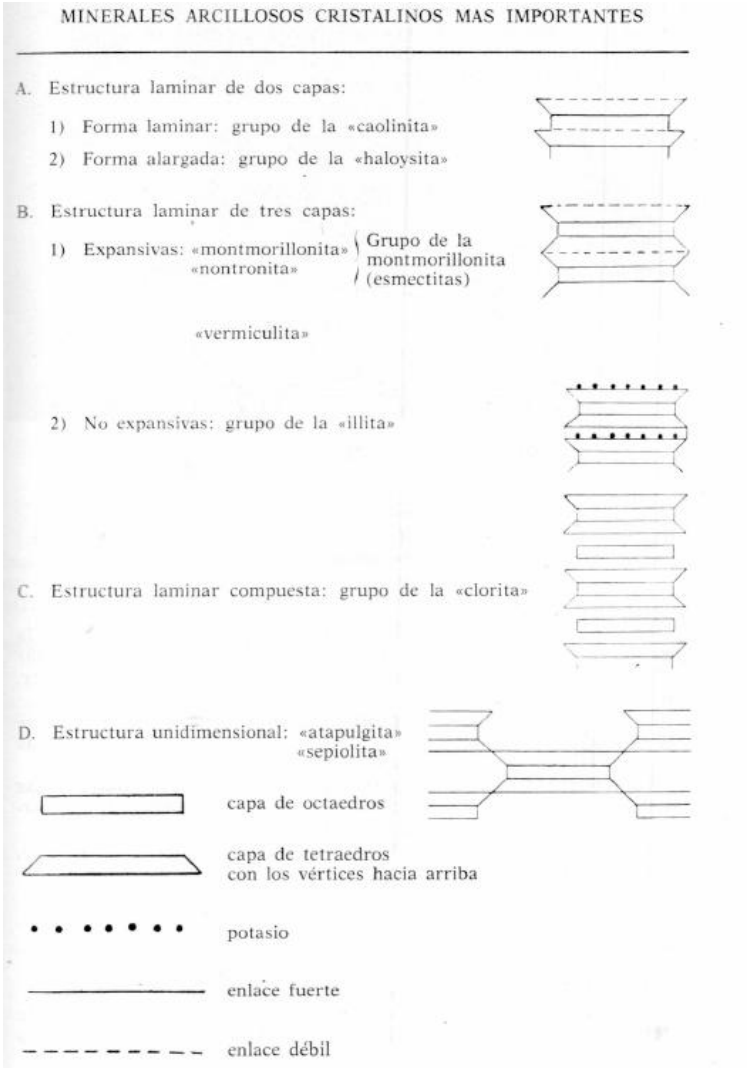


Tabla 1 - Minerales arcillosos cristalinos más importantes.

Arcilla expansible

Son suelos arcillosos que tienen la capacidad de experimentar un cambio significativo en su volumen debido a la adsorción de agua. Este comportamiento es resultado de la estructura mineralógica de los minerales arcillosos, en particular los arcillosos tipo **montmorillonita** y **bentonita**, que poseen una alta capacidad de intercambio iónico y pueden absorber grandes cantidades de agua entre sus capas, lo que provoca la expansión del suelo. Estos suelos se caracterizan por un alto potencial de hinchazón y desecación, lo cual puede generar movimientos volumétricos que afectan negativamente la estabilidad de las estructuras construidas sobre ellos. Los suelos expansibles son problemáticos en la ingeniería civil, ya que pueden causar grietas en edificios, pavimentos y otras infraestructuras.

Grupo de la montmorillonita (esmectitas)

Como muestran la Tabla 1 y la Figura 6, la unidad fundamental de la partícula de montmorillonita parece estar formada por dos capas de tetraedros que encierran una de octaedros.
La unión entre cada dos unidades es mucho más débil que el enlace de hidrógeno en las partículas de caolín. Como consecuencia, el agua puede penetrar entre ellas ocasionando una expansión de la partícula en el sentido perpendicular a la capa. Esta expansión puede ser muy grande. La vermiculita es un mineral semejante a la montmorillonita. El tamaño de las partículas de vermiculita en el sentido de la capa es mucho mayor que el de la montmorillonita.

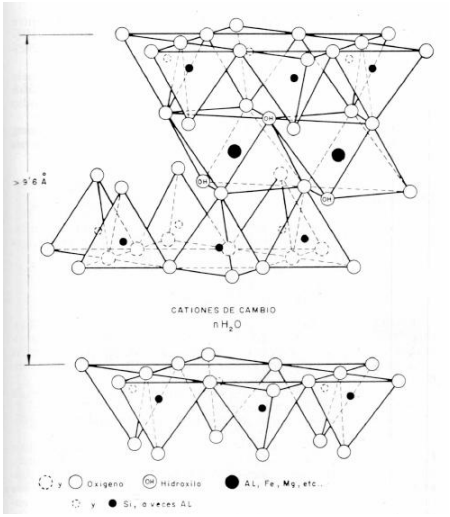


Figura 6 - Estructura química de la montmorillonita.

3. GENESIS

Existen tres mecanismos generales para la formación de arcillas por meteorización:

1. **Herencia**: El mineral de arcilla se origina en una etapa previa del ciclo de las rocas, permaneciendo estable durante su transporte y deposición sin cambios significativos.
2. **Neoformación**: La arcilla se forma por precipitación de soluciones o reacciones en materiales amorfos bajo condiciones específicas de temperatura, humedad y química.
3. **Transformación**: La arcilla modifica su composición química manteniendo parte de su estructura original, a través de intercambio iónico o cambios en su disposición interna, comunes en suelos y sedimentos.

Los coloides como la sílice y la alúmina son clave en la formación de minerales arcillosos, influyendo en las propiedades mecánicas y químicas de suelos expansivos como caolinita, esmectita e illita.

Minerales arcillosos

Caolinita

- Se forma en ambientes con poca sílice, alto contenido de alúmina, bajo pH y lixiviación de iones (Mg, Ca, Fe).
- La halloysita se desarrolla en condiciones similares, vinculada a actividad volcánica y ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Esmectita

- Estructura 2:1, favorecida por abundante sílice, pH alto y alto contenido de electrolitos.
- Asociada a rocas ígneas básicas, cenizas volcánicas y climas áridos o semiáridos.

Illita y Vermiculita

- Necesitan potasio para su formación.
- Illita: Meteorización de feldespatos en climas fríos.
- Vermiculita: Deriva de la meteorización de biotita.

Clorita

- Se forma por alteración de esmectitas con magnesio (Mg^{2+}) o en rocas metamórficas de bajo a medio grado.

4. EFECTO EXPANSIVO

Los ciclos de humedecimiento y secado a los que una arcilla puede ser sometida debido a los cambios en las condiciones climáticas producen cambios volumétricos que pueden generar problemas importantes en estructuras o construcciones civiles, como carreteras, muros de contención y viviendas. Este comportamiento depende principalmente de las características físico-químicas de la arcilla, así como de la historia de tensiones y succiones a las que ha sido sometida.

Los suelos expansivos, como las arcillas con alta concentración de minerales como la **montmorillonita**, presentan una alta capacidad de absorción de agua, lo que hace que su volumen varíe dependiendo de la cantidad de humedad presente. Cuando la humedad del suelo aumenta (por ejemplo, debido a lluvias), las partículas de arcilla se expanden, aumentando el volumen y generando un **levantamiento diferencial** que puede afectar la cimentación. Este fenómeno se conoce como **hinchamiento**. Por el contrario, cuando la humedad disminuye (debido a la evaporación o sequedad prolongada), las arcillas se contraen, lo que puede generar **asentamientos**. Ambos procesos, expansión y contracción, son responsables de las deformaciones en las estructuras que descansan sobre estos suelos.

La deformación causada por la succión está relacionada con la capacidad del suelo para retener agua en sus intersticios. En suelos arcillosos, el **potencial de succión** varía con la humedad y afecta la distribución de tensiones en la cimentación. La **succión negativa** puede incrementar el esfuerzo de compresión, mientras que una reducción en la succión, por ejemplo, debido a la humedad elevada, puede producir expansión, lo que se traduce en movimientos de la fundación.

En suelos compuestos por minerales susceptibles a cambios en el contenido de humedad, las expansiones pueden generar presiones de hinchamiento superiores a las transmitidas por la fundación, lo que resulta en un levantamiento diferencial que puede dañar la estructura. Los movimientos de una fundación en arcilla expansiva son la suma algebraica de la compresión producida por las cargas externas y la deformación provocada por los cambios en la succión.

5. CASO

Ruta 7, sector conocido como Agua de las Avispas, donde vialidades Nacional y Provincial han iniciado trabajos de reconstrucción de suelo y asfalto. Se trata de un área especialmente problemática de la ruta 7 debido a la presencia de arcilla expansiva en la composición del suelo, lo que generó múltiples deformaciones en el pavimento. (https://www.elsol.com.ar/mendoza/trabajos-en-la-ruta-7/)

Tarea de recomposición, la que incluye el remplazo del material expansivo por un manto de suelo de buena calidad y la construcción de un sistema de drenaje que capte los posibles ingresos de agua y pueda evacuarlos eficientemente. A partir de esto, se construirá una nueva estructura de pavimento.



Figura 7 - Pavimento deteriorado en Ruta 7 sector Agua de las Avispas.

6. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS EXPANSIVAS

La identificación de arcilla expansible combina observación visual, análisis de ensayos geotécnicos y caracterización mineralógica.

Métodos de identificación:

1. **Examen del perfil del suelo**: La evaluación del perfil del suelo es fundamental para identificar la presencia de arcillas expansivas. Se deben observar características como:
    - **Condición de humedad**: La presencia de humedad en el suelo puede ser un indicativo de su potencial expansivo, ya que las arcillas expansivas varían su volumen con cambios en la humedad.
    - Color: Las arcillas expansivas suelen ser negro, gris oscuro, o amarillo-grisáceo.
    - Estructura del suelo: Observación de grietas y fragmentación en períodos secos.

    Indicadores de campo: Existen ciertas características que pueden observarse directamente en el campo. Estos fenómenos reflejan el comportamiento expansivo del suelo bajo variaciones de humedad.
        1. Fisuras: Indicadores de movimientos de expansión y contracción.
        2. Superficies pulidas y estriadas causadas por presión lateral durante la hinchazón.

2. **Pruebas de laboratorio**: Las pruebas específicas son esenciales para caracterizar el comportamiento expansivo del suelo.
    - **Índice de plasticidad (PI):**

    Ensayo estándar (Atterberg): Diferencia entre límite líquido (LL) y límite plástico (PL).
    PI ≥ 12: Potencial de shattering.
    PI ≥ 17: Potencial de slickensiding.
    - **Ensayo de expansividad directa:**

    Prueba de hinchamiento libre: Mide la expansión volumétrica del suelo al saturarse.
    Prueba de presión de expansión: Evalúa la presión generada durante la hinchazón.
    - **Ensayo de actividad (A):**

    Relación entre el índice de plasticidad y el contenido de arcilla:
    A > 0.7: Indica un suelo altamente expansivo.
    - **Ensayos de encogimiento lineal (LS):**

    Mide la reducción volumétrica del suelo al secarse.
    - **Análisis mineralógico:**
    - Uso de técnicas como rayos X (DRX) para identificar minerales arcillosos expansivos (p.ej., esmectitas).
    - **Granulometría por Sedimentación**: Este ensayo se realiza para determinar la distribución del tamaño de las partículas en un suelo. En el caso de las arcillas expansibles, es especialmente útil para identificar la cantidad de partículas finas, que son las que contribuyen a las propiedades expansivas del material. La granulometría se obtiene mediante la sedimentación de partículas en un líquido, utilizando la ley de Stokes para calcular el tamaño de las partículas a partir de su velocidad de sedimentación.
    - **Densidad Aparente**: Este ensayo determina la masa de una muestra de suelo por unidad de volumen, incluyendo tanto los sólidos como los poros. En suelos arcillosos, la densidad aparente está directamente relacionada con la compactación y la capacidad del suelo para retener agua, lo que puede influir en su comportamiento expansivo.
    - **Gravedad Específica**: La gravedad específica es la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua. Este ensayo ayuda a determinar la proporción de los minerales en la arcilla y es útil para entender la estructura interna de la arcilla, que tiene un impacto directo en su capacidad para expandirse o contraerse con los cambios de humedad.
    - **Experiencia local**: La experiencia y el conocimiento sobre las condiciones del suelo en la región son cruciales para la identificación de suelos expansivos. En muchas áreas, como en ciertas zonas de Sudáfrica, se sabe que los suelos expansivos son comunes, por lo que la historia geológica y los informes previos sobre el comportamiento del suelo son esenciales en el proceso de identificación.

3. **Métodos de prueba estandarizados**: Es recomendable utilizar métodos de prueba estandarizados, para asegurar la consistencia y reproducibilidad de los resultados, garantizando que los análisis sean fiables y comparables.

7. TÉCNICAS DE MITIGACIÓN

Una de las técnicas para mitigar los problemas causados por los suelos expansivos es mezclarlos con suelos que no presentan características de hinchazón. A continuación, se presentan los resultados de un trabajo de investigación, de tres series de pruebas en las que se mezcló una arcilla expansiva con arena en diferentes proporciones, desde 0% hasta 35%.

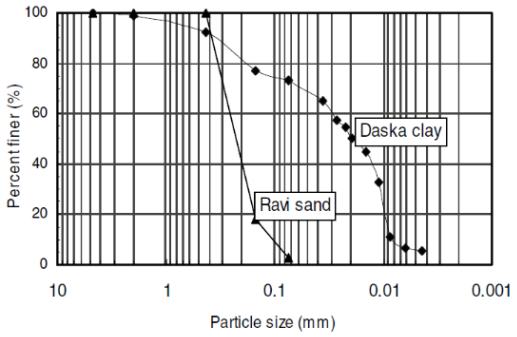
Los resultados de las **pruebas de compactación modificada AASHTO** en muestras de arcilla-arena se presentan en la Figura 8 a). La figura también incluye las curvas de compactación individuales de la arcilla Daska y la arena Ravi. Las demás muestras fueron preparadas mezclando arena Ravi con la arcilla en proporciones que varían del 5% al 35%. Como se puede observar en la figura, la densidad máxima seca aumenta y el contenido óptimo de humedad disminuye a medida que aumenta el contenido de arena.

En el caso de la arcilla pura, la **densidad máxima seca** y el OMC son 18.2 kN/m³ y 16.5%, respectivamente. Sin embargo, en las muestras de arcilla-arenas, la densidad máxima seca mejora gradualmente hasta alcanzar 19.4 kN/m³ con un OMC de 9% para la muestra con un 35% de contenido de arena.

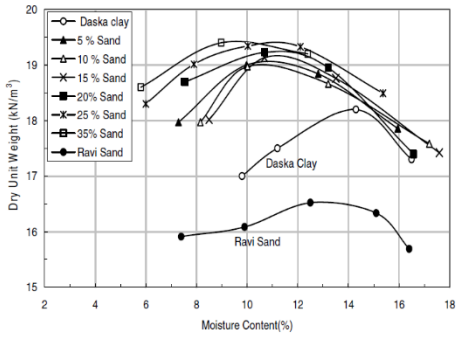
También se realizaron pruebas **CBR** en muestras de arcilla-arena con fracción de arena que varía del 0 al 35%. Se puede ver en la figura que el valor de CBR aumenta del 4% al 8.3% para la muestra de arcilla pura y la muestra con un 35% de arena, respectivamente. Este hallazgo puede ser de gran importancia en proyectos viales, donde la subrasante requiere un valor de CBR de al menos 7 a 8%. Para una subrasante de baja calidad, el CBR puede mejorarse mezclando arena en proporciones del 25% al 30%.

La Figura 8 muestra también los resultados de las **pruebas de hinchamiento** (odómetro), realizadas en muestras de suelo mezcladas con diferentes cantidades (0-35%) de arena. La figura muestra los historiales temporales del porcentaje de hinchamiento de todas las muestras de suelo, donde se puede observar que la muestra sin mezcla de arena alcanza el potencial máximo de hinchamiento (3.5%) y, a medida que aumenta el contenido de arena, disminuye el porcentaje de hinchamiento. También se observa que el tiempo de desarrollo del hinchamiento es casi el mismo en todos los casos.

El **potencial de hinchamiento** disminuye a aproximadamente 0.5% en el caso de la muestra de suelo mezclada con un 35% de arena. La muestra la variación del potencial de hinchamiento con el aumento del contenido de arena. El potencial de hinchamiento disminuye gradualmente de un valor de 3.5% para el suelo puro a 0.5% para la muestra de suelo con un 35% de mezcla de arena.



Gradation curves of Daska clay and Ravi sand



Compaction curves for all the samples

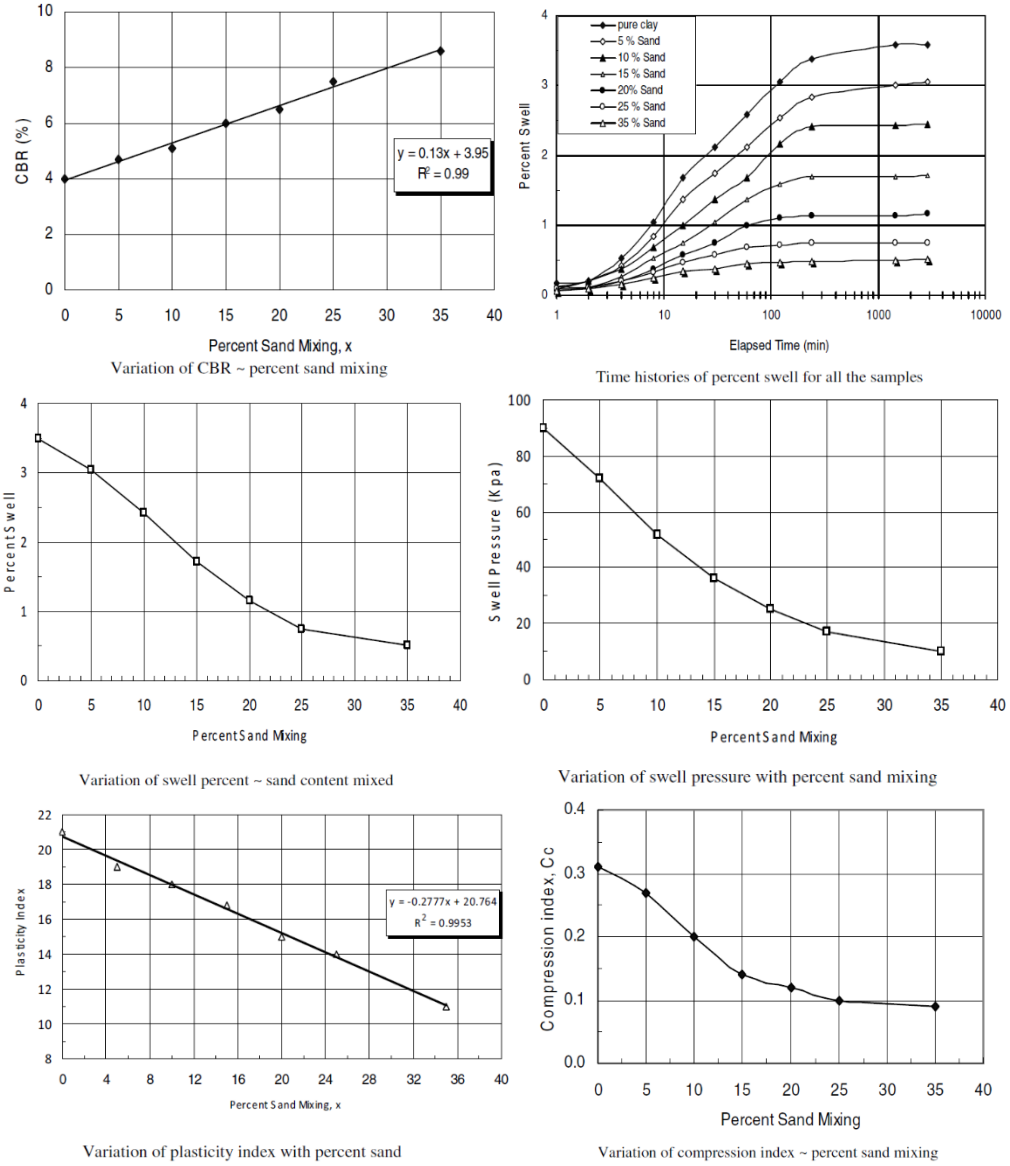


Figura 8 - Resultados de ensayos de muestras con distintas proporciones de arcilla y arena.

La muestra la **variación de la presión de hinchamiento con el porcentaje de mezcla de arena**. El valor de la presión de hinchamiento es de 90 kPa para la muestra de arcilla pura y se reduce a aproximadamente 10 kPa cuando se agrega un 35% de arena a la arcilla.

La reducción tanto del potencial de hinchamiento como de la presión de hinchamiento del suelo puede atribuirse a la disminución del índice de plasticidad del suelo arcilloso. En la figura se puede ver que, a medida que aumenta el contenido de arena, el **índice de plasticidad** (IP) disminuye de un valor de 21% (para la muestra de arcilla pura) a 11% (con un 35% de mezcla de arena).

8. INTERRACCIÓN SUELO ESTRUCTURA Y MODELOS CONSTITUTIVOS

La interacción suelo-estructura (Soil-Structure Interaction, SSI) en arcillas expansivas es un fenómeno complejo debido a los movimientos volumétricos del suelo, como hinchamiento (heave) y contracción, provocados por cambios en el contenido de humedad. Estos movimientos generan esfuerzos adicionales y deformaciones diferenciales en estructuras como losas de cimentación (slab-on-ground foundations).

Principales desafíos en SSI con arcillas expansivas:

1. Movimientos diferenciales: Variaciones no uniformes en la humedad del suelo producen levantamientos (heave) y asentamientos irregulares.
2. Relación suelo-estructura: La rigidez de la estructura influye en cómo se distribuyen los desplazamientos y esfuerzos en el suelo.
3. Efecto del entorno: Las condiciones climáticas, como la lluvia y la evaporación, influyen directamente en la distribución de humedad en el suelo expansivo.

Modelos constitutivos usados en arcillas expansivas

Debido a la complejidad de su comportamiento, los modelos constitutivos para arcillas expansivas deben ser capaces de capturar tanto el comportamiento elástico como el **plástico** de las arcillas, así como su **expansión** o **contracción** con los cambios de humedad (**acoplamiento mecánico-hidráulico).** Estos modelos constitutivos son esenciales para el diseño y análisis de estructuras en áreas donde las arcillas expansibles son predominantes. Ayudan a predecir el comportamiento del suelo y sus interacciones con las estructuras, lo cual es clave para evitar daños estructurales a largo plazo. Los avances en los modelos y las simulaciones permiten una mejor comprensión de cómo estos suelos responden a las variaciones en humedad y carga, lo que facilita la implementación de soluciones efectivas para mitigar los problemas asociados con la expansión y contracción de las arcillas.

9. CONCLUSIONES

Es fundamental poder identificar a tiempo la presencia de materiales expansivos en un terreno, ya que su comportamiento puede tener un impacto negativo considerable en la estabilidad y durabilidad de las estructuras construidas sobre ellos. Los suelos expansivos, como las arcillas que presentan un alto índice de expansión y contracción con los cambios de humedad, son una preocupación significativa en la ingeniería civil. Si no se gestionan adecuadamente, estos suelos pueden causar daños a largo plazo, que no solo comprometen la integridad estructural de las edificaciones, sino que también afectan la seguridad y funcionalidad de las infraestructuras.

La identificación temprana de estos materiales expansivos permite tomar medidas preventivas, ya sea durante la fase de diseño de la obra o una vez construida. Existen diferentes alternativas técnicas que pueden ayudar a mitigar o contrarrestar los efectos de los suelos expansivos, como el tratamiento del suelo con estabilizantes, la mejora del drenaje, o el uso de materiales no expansivos en las capas superficiales. Sin embargo, cada una de estas soluciones debe ser evaluada cuidadosamente desde el punto de vista técnico y económico. La solución más adecuada dependerá de varios factores, como la magnitud del problema del suelo, la ubicación del proyecto, el tipo de estructura y el presupuesto disponible.

10. REFERENCIAS

- Deméneghi, A. (s.d.). *Deformations assessment in expansive clays*.
- Farooq, K. (s.d.). *Improvement of engineering characteristics of expansive clays by sand mixing*.
- Manzanal, D. (s.d.). *Swell characterization of expansive clays from Comodoro Rivadavia, Argentina*.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. Wiley.
- Netterburg, F. (s.d.). *Identification of potentially expansive clay soils from soil structure*.
- Richards, B. (s.d.). *Model for slab foundations on expansive clays*.
- Jiménez Salas, J. A., & de Justo Alpañes, J. L. (s.d.). *Geotecnia y cimientos I* (2da ed.).
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Pearson.
- OpenAI. (2024). *ChatGPT* [Modelo de lenguaje]. OpenAI. https://openai.com/chatgpt