

Capítulo 3

Influencia de la materia orgánica en los parámetros de comportamiento mecánico de un suelo natural versus un suelo estabilizado químicamente con cemento: análisis laboratorial y numérico.

Influence of Organic Matter on the Mechanical Behavior Parameters of a Natural Soil versus a Chemically Stabilized Soil with Cement: Laboratory and Numerical Analysis.

Zuñiga Villarroel, Nicolás  y Villarroel Ortega, Jorge 

Resumen

La investigación se enfocó en un suelo orgánico proveniente de la Región de Magallanes y su estabilización química con cemento. Mediante ensayos como granulometría, límites de consistencia y edométrico, se identificaron propiedades clave, incluido un coeficiente de consolidación para el suelo estabilizado. Los resultados experimentales fueron complementados con un análisis numérico en PLAXIS 2D[®], que permitió verificar el comportamiento del suelo bajo cargas simuladas. Este enfoque integral demostró que la estabilización incrementa la resistencia y reduce el asentamiento, lo que mejora su aptitud para aplicaciones como cimentaciones y terraplenes. El trabajo constituye un aporte significativo al campo de la geotecnia, ofreciendo soluciones sostenibles y eficaces para el diseño de estructuras en suelos con baja capacidad portante.

Palabras claves— Estabilización de suelos, materia orgánica, comportamiento mecánico, PLAXIS 2D[®], granulometría.

CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO NATURAL VERSUS UN SUELO ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON CEMENTO: ANÁLISIS LABORATORIAL Y NUMÉRICO.

Abstract

The research focused on an organic soil from the Magallanes Region and its chemical stabilization with cement. Key properties were identified through tests such as granulometry, consistency limits, and edometer analysis, including a consolidation coefficient for the stabilized soil. The experimental results were complemented by numerical analysis in PLAXIS 2D®, which enabled the verification of the soil's behavior under simulated loads. This comprehensive approach demonstrated that stabilization increases strength and reduces settlement, improving its suitability for applications such as foundations and embankments. The study represents a significant contribution to the field of geotechnics, offering sustainable and effective solutions for the design of structures on low-bearing-capacity soils.

Keywords— Soil stabilization, organic matter, mechanical behavior, PLAXIS 2D®, grain size distribution.

3.1. Introducción.

El estudio del comportamiento mecánico de los suelos es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica, especialmente cuando se trata de suelos con alta presencia de materia orgánica, como las turbas. Este tipo de suelos, debido a su baja resistencia y alta compresibilidad [1], representan un desafío importante para el diseño y la estabilidad de estructuras civiles. Ante esta problemática, una alternativa ampliamente utilizada es la estabilización química mediante el uso de aglutinantes como el cemento, con el fin de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

El presente trabajo tiene como propósito analizar la influencia de la materia orgánica en los parámetros de comportamiento mecánico de un suelo natural, comparado con un suelo estabilizado químicamente con cemento. Para ello, se lleva a cabo una investigación combinada que integra ensayos de laboratorio y análisis numéricos, con el fin de evaluar y comparar el desempeño de ambos tipos de suelo bajo condiciones de carga controladas. A través de este estudio se busca no solo caracterizar adecuadamente los suelos involucrados, sino también verificar mediante simulaciones numéricas el comportamiento global de la estructura geotécnica. Los resultados obtenidos permitirán establecer conclusiones relevantes en cuanto a la eficacia de la estabilización con cemento, y su aplicabilidad en proyectos de ingeniería donde predominan suelos orgánicos.

3.2. Estado del arte

El estudio sistemático del suelo se originó en Rusia, liderado inicialmente por Mijaíl Lomonósov (1711–1765), y consolidado por Vasili Dokucháyev (1846–1903), considerado el fundador de la pedología moderna. En Chile, la diversidad climática y geográfica permite clasificar sus suelos en zonas áridas, templadas y australes, lo que da lugar a una amplia variedad de condiciones edáficas con implicancias directas en el diseño de obras geotécnicas [2].

Entre los tipos de suelos más complejos desde el punto de vista de la ingeniería civil se encuentran aquellos con alto contenido de materia orgánica, como las turbas [3]. Estos suelos se originan por la acumulación de vegetales no descompuestos o levemente descompuestos en ambientes húmedos, y presentan características que los hacen inadecuados para el apoyo de cimentaciones: alta deformabilidad, baja capacidad portante, inestabilidad volumétrica y elevada compresibilidad. Comúnmente presentes en zonas pantanosas, las turbas se distinguen por su color café oscuro o negro, su bajo peso cuando están secas y su alta porosidad. La generación de materia orgánica en estos suelos se debe a la acción de bacterias, hongos y lombrices, lo que contribuye a su estructura blanda e inestable.

Ante esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento mecánico de un suelo turbidífico (turba) y compararlo con el mismo suelo estabilizado químicamente mediante la adición de cemento. Para ello, se realizarán ensayos monotónicos de laboratorio, junto con simulaciones

3.3. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL.

numéricas utilizando el método de elementos finitos, con el fin de evaluar su respuesta estructural bajo condiciones de carga controladas. Esta investigación busca determinar el grado de mejora que puede alcanzarse con la estabilización química, proponiendo una solución viable para la construcción en zonas con suelos orgánicos.

3.3. Clasificación del material.

El material granular se clasifica según el tamaño de sus partículas, lo que influye significativamente en sus propiedades y aplicaciones. La clasificación es la siguiente:

- **Gravas:** partículas con un tamaño mayor a 2 mm. Se emplean como agregado pétreo para hormigón y como material de relleno.
- **Arenas:** partículas con un tamaño entre 0.06 mm y 2 mm. Son comunes en la fabricación de morteros y en rellenos estructurales.
- **Limos y arcillas:** partículas menores a 0.06 mm. En especial, las arcillas tienen partículas inferiores a 0.002 mm, con una textura plástica debido a su alta afinidad por el agua. En construcción, se consideran suelos de baja capacidad de carga.

3.4. Límite de consistencia.

Las pruebas de laboratorio realizadas para conocer el comportamiento plástico del suelo en distintas condiciones de humedad arrojaron un límite líquido de 28,8 % y un límite plástico de 15 %, lo que genera un índice de plasticidad de 13,5 %. Estos resultados reflejan un suelo con baja plasticidad y, por lo tanto, con menor probabilidad de sufrir deformaciones significativas ante esfuerzos mecánicos, lo cual resulta favorable en proyectos de edificación donde se requiere buena estabilidad.

3.5. Clasificación AASHTO y SUCS.

La clasificación AASHTO ubica a este suelo en el grupo A-6 (10), típico de arcillas finas que presentan restricciones para su uso en pavimentación si el contenido de humedad es elevado. Bajo el sistema SUCS, se categoriza como CL, una arcilla inorgánica con baja plasticidad, lo cual implica que puede ser utilizado si se mejora mediante técnicas de estabilización [4].

Tabla 3.1: Análisis Granulométrico.

Tamiz (pulg)	Tamiz (mm)	% Retenido	% Ret.Acum	% Pasa
3"	76,20	0,0	0,0	100,0
2 1/2"	63,50	0,0	0,0	100,0
2"	50,80	0,0	0,0	100,0
1 1/2"	38,10	0,0	0,0	100,0
1"	25,40	2,0	2,0	98,0
3/4"	19,00	1,1	3,1	96,9
1/2"	12,70	0,7	3,8	96,2
3/8"	9,50	0,7	4,5	95,5
#4	4,75	6,4	10,9	89,1
#8	2,00	0,1	11,0	89,0
#10	2,00	0,0	11,0	89,0
#16	1,18	0,1	11,1	88,9
#30	0,60	0,1	11,2	88,8
#40	0,425	0,0	11,2	88,8
#50	0,297	0,0	11,2	88,8
#100	0,149	0,0	11,2	88,8
#200	0,074	0,1	11,3	88,7
Pasa #200	—	—	—	88,7

Masa húmeda total antes del lavado: 14993,0 g.

Masa seca total antes del lavado: 14993,0 g.

Masa seca después de lavar: 13462,0 g.

Tabla 3.2: Propiedades de plasticidad del suelo.

% Límite Líquido	28,5
% Límite Plástico	15,0
% Índice de Plasticidad	13,5

3.6. Ensaye hidrométrico; Método de Bouyoucos.

Los resultados del análisis granulométrico por hidrometría determinaron una composición del suelo de

CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO NATURAL VERSUS UN SUELO ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON CEMENTO: ANÁLISIS LABORATORIAL Y NUMÉRICO.

6,7% de arcilla, 43,7% de limo y 49,5% de arena. Esta proporción indica un suelo con plasticidad intermedia y buen potencial de compactación. No obstante, el alto contenido de partículas finas limita su uso en aplicaciones que demanden alta resistencia. En general, las características físicas y mecánicas del suelo permiten su uso en ciertas construcciones, siempre que se implementen métodos adecuados de tratamiento y control del contenido de humedad.

3.7. Ensayo edométrico.

El ensayo edométrico bajo la norma ASTM D2453 es un procedimiento utilizado para evaluar la compresibilidad y consolidación de los suelos, particularmente en arcillas y limos. Se realiza para obtener información sobre el asentamiento de las estructuras bajo cargas a largo plazo [5].

1. Implementos.

- Cámara edométrica: dispositivo que permite aplicar carga vertical al suelo mientras se controla el drenaje.
- Prensa de carga: con el que se aplica la carga al suelo.
- Manómetro: para medir presión aplicada.
- Balanza: para pesar la masa de suelo antes y después del ensaye

2. Procedimiento

El ensayo edométrico se inicia con la **selección de una muestra de suelo representativa** del sitio de interés, asegurando que sus características sean adecuadas para obtener resultados fiables. Luego, la muestra se **coloca en una celda edométrica**, un dispositivo rígido con filtros porosos en la parte superior e inferior para permitir la salida del agua durante la consolidación. La muestra se **satura completamente** con agua destilada y se monta un sistema de carga, colocando una placa sobre ella para aplicar presiones verticales. A continuación, se aplica una **carga inicial leve**, normalmente el peso de la placa, y se **registra la altura inicial y la deformación** usando un reloj comparador o sensor de desplazamiento. Posteriormente, se aplican **cargas sucesivas de forma incremental**, generalmente duplicando la carga anterior, y se registra el **asentamiento de la muestra en distintos intervalos de tiempo**

(segundos y minutos), hasta alcanzar la consolidación primaria, que se identifica cuando las deformaciones se estabilizan.



Figura 3.1: Curva de consolidación bajo carga.

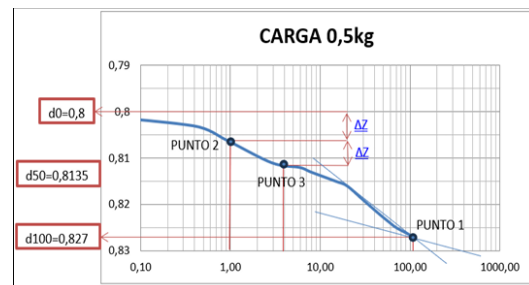


Figura 3.2: Curva de consolidación bajo carga de 0,5 kg.

3.8. Software Plaxis 2D®

PLAXIS 2D® es una herramienta poderosa creada por Bentley Systems para realizar estudios geotécnicos en 2D. Se emplea para simular cómo reaccionan los suelos y estructuras frente a distintas cargas, siendo muy útil en proyectos como cimentaciones, muros y excavaciones. Gracias al método de elementos finitos, permite modelar con gran precisión

tanto la estabilidad del terreno como las deformaciones esperadas. Entre los modelos de suelo disponibles, uno de los más comunes es el modelo Mohr-Coulomb, que ofrece una forma práctica de representar el comportamiento del suelo a través de un enfoque elastoplástico basado en la teoría de corte.

Los modelos constitutivos son formulaciones matemáticas que permiten representar el comportamiento de los materiales cuando se ven sometidos a cargas. En el campo de la geotecnia, se emplean principalmente para comprender y anticipar cómo los suelos reaccionan ante esfuerzos y deformaciones. Estos modelos resultan esenciales para el análisis geotécnico, ya que facilitan la simulación del comportamiento del terreno ante diferentes tipos de carga, como las que afectan a cimentaciones, excavaciones, muros de contención y terraplenes. La selección de un modelo constitutivo depende de múltiples factores, como el tipo de suelo, el nivel de precisión requerido y las condiciones de carga. En este trabajo, se optará por el modelo Mohr-Coulomb para representar tanto el comportamiento ideal como el real del suelo.

1. Modelos constitutivos.

Los modelos constitutivos son formulaciones matemáticas que permiten representar el comportamiento de los materiales cuando se ven sometidos a cargas. En el campo de la geotecnia, se emplean principalmente para comprender y anticipar cómo los suelos reaccionan ante esfuerzos y deformaciones. Estos modelos resultan esenciales para el análisis geotécnico, ya que facilitan la simulación del comportamiento del terreno ante diferentes tipos de carga, como las que afectan a cimentaciones, excavaciones, muros de contención y terraplenes. La selección de un modelo constitutivo depende de múltiples factores, como el tipo de suelo, el nivel de precisión requerido y las condiciones de carga. En este trabajo, se optará por el modelo Mohr-Coulomb para representar tanto el comportamiento ideal como el real del suelo.

3.9. Modelo Mohr Coulumb.

El modelo Mohr-Coulomb es uno de los modelos constitutivos más básicos y utilizados en la mecánica

de suelos y rocas para analizar la resistencia al corte y el comportamiento de materiales geotécnicos bajo carga. Su formulación está basada en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, que se fundamenta en cómo los esfuerzos internos del suelo, tanto cortantes como normales, interactúan hasta un punto de falla.

3.10. Resultados Software Plaxis 2D®

1. Total Displacements.

El valor de 0,1379 m entregado por Plaxis 2D® está relacionado con el “total de desplazamiento” o “asentamiento máximo” que ha ocurrido en el modelo geotécnico. Este valor representa el desplazamiento vertical máximo en un punto específico del terreno o del terraplén debido a las cargas aplicadas, como el peso del propio terraplén o las cargas externas.

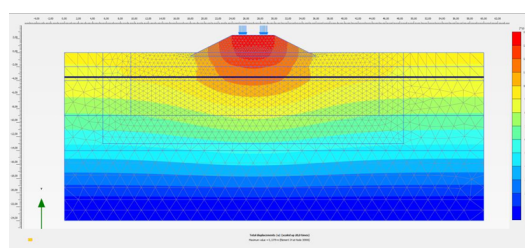


Figura 3.3: Desplazamiento total.

2. Total deviatoric strain.

Los valores indicados, Maximum value = $8,705 \times 10^3$ y Minimum value = $3,033 \times 10^3$, corresponden a la deformación total desviadora (total deviatoric strain) calculada en el modelo de Plaxis 2D®. Este parámetro cuantifica cuánto se deforma el terreno debido a las cargas aplicadas, como en este caso, el peso del terraplén.

- Valor máximo ($8,705 \times 10^3$): Representa la deformación más alta registrada, equivalente a aproximadamente un 0,87 %.
- Valor mínimo ($3,033 \times 10^3$): Indica la menor deformación dentro del modelo, cercana al 0,30 %.

CAPÍTULO 3. INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA EN LOS PARÁMETROS DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN SUELO NATURAL VERSUS UN SUELO ESTABILIZADO QUÍMICAMENTE CON CEMENTO: ANÁLISIS LABORATORIAL Y NUMÉRICO.

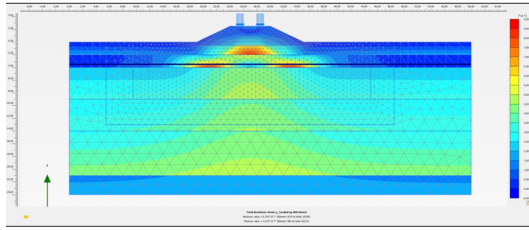


Figura 3.4: Total deviatoric strain.

3.11. Conclusiones

El estudio realizado demuestra que caracterizar correctamente los suelos orgánicos es clave para determinar si pueden ser usados en obras de ingeniería. Las pruebas de laboratorio confirmaron que, en su estado natural, estos suelos no son aptos para resistir cargas importantes debido a su baja resistencia y alta deformabilidad.

Sin embargo, al aplicar estabilización con cemento, se observaron mejoras notables en aspectos como rigidez, consolidación y resistencia al corte, lo cual se traduce en un comportamiento más favorable del terreno ante cargas estructurales.

El modelado numérico con PLAXIS 2D respaldó estos resultados, mostrando que el suelo estabilizado tiene mejor respuesta en cuanto a tensiones y deformaciones. En comparación, el suelo tratado es claramente más adecuado para soportar terraplenes y cimentaciones.

En conclusión, la combinación de técnicas experimentales y análisis computacional permite proponer soluciones efectivas y sostenibles para la construcción sobre suelos orgánicos, siendo la estabilización con cemento una opción técnica y viable a largo plazo.

Bibliografía

- [1] J. Smith, "Influencia de la materia orgánica en suelos", *Revista Ingeniería Geotécnica*, vol. 10, no. 2, pp. 123–130, 2021.
- [2] A. Vásquez, "Suelos de fundación de la ciudad de Punta Arenas, región de Magallanes y Antártica Chilena," Santiago, Chile, 2018.
- [3] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), "Boletín INIA no. 256," Santiago, Chile, 2021.
- [4] Ministerio de Obras Públicas, *Manual de Carreteras, Volumen N°8: Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control*, MOP, 2022.
- [5] ASTM D2453, *Standard Practice for Determination of Real Density of Calcined Petroleum Coke by Helium Pycnometer*, ASTM International, USA.