

CAPITULO 1.

INTRODUCCION AL PROBLEMA DE CONSOLIDACION

◆ **Definición. El problema de Terzaghi**

◆ **El problema de Biot**

◆ **Planteo de la propuesta**

1.1. Definición. El problema de Terzaghi.

El proceso de deformación de una masa de suelo bajo carga, se debe principalmente a la reducción del volumen de los vacíos, llamados *poros*.

Para el caso en que esos vacíos se encuentren llenos de agua, situación que se conoce como *suelo saturado*, la disminución de volumen se puede producir solo si el agua de los poros es expulsada paulatinamente. El asiento gradual del terreno en tales condiciones provocado por las cargas, se llama *consolidación*.

Cuando el terreno es muy permeable, este proceso es casi instantáneo, puesto que el agua es expelida rápidamente. El caso de las arcillas o limos arcillosos es bien diferente al citado puesto que, la dificultad que encuentra el agua para escurrir dentro de la masa de suelo aumenta considerablemente el interés de tratar al problema con la variable tiempo como una de las protagonistas principales. Es este último caso, el que trataremos en este trabajo, no solamente por lo expuesto sino que es el tipo de suelo que mas abunda en la zona del gran Resistencia.

Es muy común caracterizar el problema de la consolidación a través del siguiente proceso : La carga aplicada a la masa de suelo, como consecuencia de la casi incompresibilidad del agua alojada en los poros, es tomada casi en su totalidad por ésta. A esta tensión de característica hidrostática, se llama *tensión neutra* .Luego, según transcurra el tiempo, las partículas de suelo se reorganizan aumentando el contacto mutuo y van adquiriendo carga en mayor proporción. Esta tensión *genuina de la masa sólida* ,que se incrementa, se denomina *tensión efectiva* .La suma de ambas debe siempre equilibrar a la carga externa o la debida al peso propio y se llama *tensión total* .Cuando el agua haya sido expulsada en una medida suficiente como para anular la presión de poros, la tensión efectiva será igual a la total.

La anterior idea, propuesta por Terzaghi, es expresada matemáticamente de la siguiente manera :

$$\sigma = \sigma' + m_p \quad (1.1)$$

donde $\underline{\sigma}'$ es un vector que contiene la tensión efectiva, \mathbf{p} es la tensión neutra (también presión de poros) y \underline{m} es un vector cuyas componentes son $\{1,1,1,0,0,0\}$.

Desde hace tiempo, se ha venido utilizando la denominada Teoría de Consolidación de Terzaghi para analizar el valor que toman las variables de tensión y de deformación. Dicha ecuación parte de las ecuaciones del equilibrio, de la ecuación constitutiva del suelo (elástica) y la ecuación de continuidad del fluido. La expresión mas conocida es :

$$c_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad (1.2)$$

con la siguiente expresión conocida como *coeficiente de consolidación* :

$$c_v = \frac{k(1+e)}{\gamma a_v} \quad (1.3)$$

donde k es la permeabilidad, e la relación de vacíos, γ el peso específico del agua , $a_v = -\frac{\partial e}{\partial \sigma_v}$, σ_v la tensión vertical, z la coordenada vertical y t tiempo. El coeficiente de consolidación se obtiene a partir de ensayos de laboratorio en un consolidómetro. Con respecto a este ensayo, las curvas que se obtienen con base en las variables relación de vacíos - deformación, llamadas también curvas de compresibilidad, permite recordar algunos conceptos importantes como ser la **recta virgen** o **normalmente consolidada** que es la parte final del ensayo donde la muestra de suelo experimenta sollicitaciones **sin precedentes** en su historia de cargas.

Aplicando las siguientes hipótesis a (1.2) :

- a) El esfuerzo total es constante con el tiempo ;
- b) La sobrepresión intersticial inicial es uniforme con la profundidad ;
- c) Solamente hay drenaje en la parte superior e inferior de la masa estudiada ;

se llega a la ecuación :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial Z^2} = \frac{\partial p}{\partial T} \quad (1.4)$$

con las cantidades adimensionales siguientes :

$$Z = \frac{z}{H} \text{ y } T = \frac{c_v t}{H^2} \quad (1.5)$$

donde, Z es profundidad , H es la mitad del espesor del estrato analizado y T es factor tiempo.

Todo lo anterior, es evidentemente aplicable a la consolidación unidimensional y aún cuando la integración de (1.2) no sería de mayor complejidad, se ha optado, por cuestiones prácticas, por una representación gráfica de la (1.4) (en Figura 4.3 se presenta resuelta por series y numéricamente) y a partir de ella, previo cálculo de los valores adimensionales para cada caso en particular, resolver problemas prácticos ^[3].

El método brevemente presentado en el párrafo precedente, es también usado para casos donde realmente el proceso de consolidación es bidimensional debido a su simplicidad de implementación. Por supuesto, los valores obtenidos muchas veces difieren considerablemente de los reales, además de no permitir un tratamiento unificado del problema deformación - tensión de una forma general.

1.II. El problema de Biot.

La teoría de consolidación de Terzaghi, si bien ha probado ser extremadamente útil en la práctica, no tiene en cuenta todos los aspectos del comportamiento de la masa de suelo bajo cargas.

Aparece en escena entonces, Maurice Anthony Biot nacido en Bélgica (1905) pero cuya actividad científica se realizó en los Estados Unidos. A lo largo de su vida trabajó en diversos temas como ser los relacionados con aeronáutica, electromagnetismo, termodinámica y , lo que básicamente nos interesa, los problemas de la mecánica del sólido y medios porosos.

El interés de Biot en la mecánica de los medios porosos empieza en 1940, con un artículo fundamental para la consolidación en la mecánica de suelos, retornando poste-

riormente al tema en la década del '50 para generalizar los principios para cualquier medio poroso con fluidos viscosos en sus poros.

En su artículo de 1955 plantea, desde un punto de vista teórico formal, la compatibilidad entre tensiones totales y deformaciones durante la consolidación. El resultado fue un sistema de ecuaciones *acopladas*.

Se entiende por *sistemas acoplados*, a aquellos aplicables a dominios múltiples y a variables independientes que usualmente describen fenómenos físicos diferentes y en los cuales, ningún dominio puede ser resuelto separado del otro y ningún conjunto de variables independientes puede ser explícitamente eliminado. El acoplamiento puede darse de diversas maneras ya sea con superposición total o parcial de dominios o a través de interfaces. Nuestro caso es el primero.

El problema de Biot presenta algunas limitaciones desde el punto de vista de su aplicación. Primeramente, las soluciones cerradas son de muy difícil obtención por las características del sistema. Algunas soluciones cerradas fueron obtenidas por Mc Namee y Gibson (1960). En general se trataban de soluciones en medios semi infinitos o capas de profundidad determinada sometida a estado plano, axial simétrico o triaxial. Aún cuando las condiciones de borde eran muy estrictas, se consiguió modelar varios aspectos más que con el modelo de Terzaghi.

Para paliar el déficit anterior, es de fundamental importancia la aplicación del Método de los Elementos Finitos. Mediante su uso, puede abordarse situaciones con dominios no regulares y condiciones de borde muy variables.

Además, las presiones de poros que se predicen con la teoría se apartan mucho de las obtenidas en laboratorio, para arcillas principalmente, debido a que se asume un comportamiento elástico lineal para el suelo y esto difiere en gran medida de la realidad. Esta suposición provoca, por ejemplo, en el caso de ensayos no drenados, que las presiones de poros obtenidas dependen exclusivamente de las tensiones normales principales, cuando en la realidad, las cortantes tienen gran influencia. Entonces, parece muy conveniente, incorporar a la teoría clásica de Biot, una relación tensión - deformación

de tipo elastoplástica basada en la teoría de estados críticos, que será descrita brevemente luego.

Claramente entonces, puede mejorarse notablemente la formulación original, que será presentada en el próximo capítulo, mediante la incorporación de lo mencionado previamente.

1.III. Planteo de la propuesta.

Muchos problemas de la geomecánica, tales como el aislamiento de residuos provenientes de actividades nucleares, fractura hidráulica, extracción de energía geotérmica, transporte de contaminantes, consolidación de suelos, daños causados por la expansión y retracción de suelos, etc. son analizado abordando el comportamiento de medios poroso saturados, considerando el acoplamiento del medio sólido (esqueleto) y el fluido que fluye por sus poros. Muchos de los casos mencionados arriba implican también en la consideración de efectos higrótérmicos.

Existen problemas donde la naturaleza bifásica (suelo - agua) es insuficiente para describir el fenómeno, debido a las características multifásicas de los fluidos que fluyen en los poros (y que pueden inclusive dar origen a reacciones químicas). El comportamiento de suelos no saturados, donde existe flujo de agua y gas (aire) en los poros es un ejemplo importante de problemas trifásicos.

El proyecto de presas de tierra, así como otros tipos estructurales, trajeron importantes desafíos en el análisis de las fundaciones y de las propias estructuras. Una de las cuestiones importantes es el asentamiento, tanto el inicial como el que se produce después de un cierto tiempo, que permite la disipación del exceso de presión en los poros. Un asentamiento excesivo irregular, puede causar daños muy serios a la estructura, siendo que movimientos excesivos verticales y de volcamiento pueden también originar dificultades operacionales.

El objetivo fundamental de este trabajo es el de presentar y aplicar un modelo numérico para el análisis de consolidación y filtración en presas de tierra y suelos donde se asientan las fundaciones de estructuras usando el método de los Elementos Finitos.

Para el suelo será considerado un modelo elastoplástico o, alternativamente, un modelo viscoplástico.

Una de las limitaciones importantes de este trabajo es que el mismo se restringirá a tratar apenas medios porosos saturados, dejando el caso no saturado (o también denominados parcialmente saturados) para un segundo paso, que completará esta primera etapa, transformándola en un caso particular.

Como hemos mencionado en apartados anteriores, Biot^[1], ^[2] y Terzaghi ^[3] describieron el comportamiento acoplado sólido - fluido, considerando un esqueleto elástico lineal. A partir de estos trabajos pioneros, muchos otros fueron presentados, resolviendo analítica o numéricamente el problema; en este último caso la gran mayoría de los trabajos usa el método de los elementos finitos y un modelo elasto - plástico para el suelo (esqueleto), con desplazamientos finitos o infinitesimales; como el numero de publicaciones en el área de análisis del comportamiento de medios porosos saturados es muy grande, se indican apenas algunos considerandos relevantes, tales como las referencias ^[4] a ^[8].

Como el caso de medios porosos no saturados será tratado en una segunda etapa, como fue mencionado arriba, referencias bibliográficas sobre este tema no serán incluidas.

En el capítulo II será presentada la formulación del problema y las ecuaciones que gobiernan el mismo conjuntamente con la descripción del modelo constitutivo o modelo de estado crítico. En el capítulo III será analizada la formulación del Método de los Elementos Finitos, incluyendo la formulación incremental a ser utilizada tanto para desplazamientos infinitesimales como para desplazamientos finitos.

Aplicaciones del modelo, conclusiones y consideraciones finales ; serán mostradas en el capítulo IV. Finalmente, se presentará la bibliografía utilizada.

<u>CAPITULO 1. INTRODUCCION AL PROBLEMA DE CONSOLIDACION</u>	11
1.I. DEFINICIÓN. EL PROBLEMA DE TERZAGHI.	12
1.II. EL PROBLEMA DE BIOT.	14
1.III. PLANTEO DE LA PROPUESTA.	16