

LOS SUELOS ORGANICOS, SU ORIGEN Y PROPIEDADES

FERNANDO M. ROMAN

Valencia, Julio 1.977

## INDICE

- 1.- Introducción
- 2.- Definiciones
- 3.- Origen y formación de los suelos orgánicos
  - 3.1.- Proceso de formación de una turbera
  - 3.2.- Evolución de los depósitos turbosos
    - 3.2.1.- Zonas de albuferas en llanuras costeras
    - 3.2.2.- Zonas de albuferas en costas acantiladas
    - 3.2.3.- Marismas en las vegas de los ríos
    - 3.2.4.- Zonas de deltas
    - 3.2.5.- Lagos interiores de agua dulce
- 4.- Propiedades de la turba
  - 4.1.- Consideraciones previas
  - 4.2.- Estructura
  - 4.3.- Peso específico. Contenido de materia orgánica. Gases
  - 4.4.- Densidad seca. Humedad
  - 4.5.- Compresibilidad, índice de poros
  - 4.6.- Plasticidad
  - 4.7.- Permeabilidad
  - 4.8.- Resistencia al esfuerzo cortante
  - 4.9.- Compresibilidad de las turbas
    - 4.9.1.- Consideraciones generales
    - 4.9.2.- Análisis del fenómeno de la consolidación
    - 4.9.3.- Sobreconsolidación. Su relación con la consolidación secundaria
- 5.- Agradecimientos
- 6.- Referencias bibliográficas

## 1.- Introducción

Hasta hace relativamente pocos años, dos o tres décadas tan solo, la ubicación de la mayor parte de las construcciones realizadas por el hombre estaban íntimamente supeditadas a la calidad del terreno sobre el que se ejecutaban. Si el terreno carecía de la estabilidad necesaria, se buscaba otro emplazamiento de mejor soporte.

Conforme las necesidades de industria, de comunicaciones, de edificación etc., han ido aumentando, el hecho anteriormente citado puede, en determinadas ocasiones, considerarse como un lujo. Por otra parte, la técnica, el conocimiento de las propiedades y del comportamiento de los suelos y rocas ha evolucionado de tal manera, que hoy en día pueden solucionarse problemas que eran inabordable antaño.

Los suelos orgánicos son un claro ejemplo de estos hechos.

Adelantando conocimientos, se puede decir que son extremadamente compresibles y su resistencia al corte bajísima, razón por la que son incompatibles con la mayor parte de las construcciones del hombre.

En general suelen estar asociados a zonas de gran extensión, de antiguas o actuales marismas, donde el nivel freático está relativamente cercano a la superficie y en donde la utilización de la superficie es prácticamente nula. Por la propia naturaleza orgánica del suelo en sí y por el contenido elevado de humedad es frecuente la implantación, en los confines de estas áreas, de zonas de cultivo principalmente de huerta como ocurre en el Levante Español.

Si se imagina una región de la costa donde exista una antigua zona de marisma separada del mar por un cordón litoral de duna, y donde es necesario implantar una construcción (edificios, fábricas, carreteras ...) con toda seguridad, se realizarán sobre las

arenas del cordón litoral, de indudable mejor calidad geotécnica.

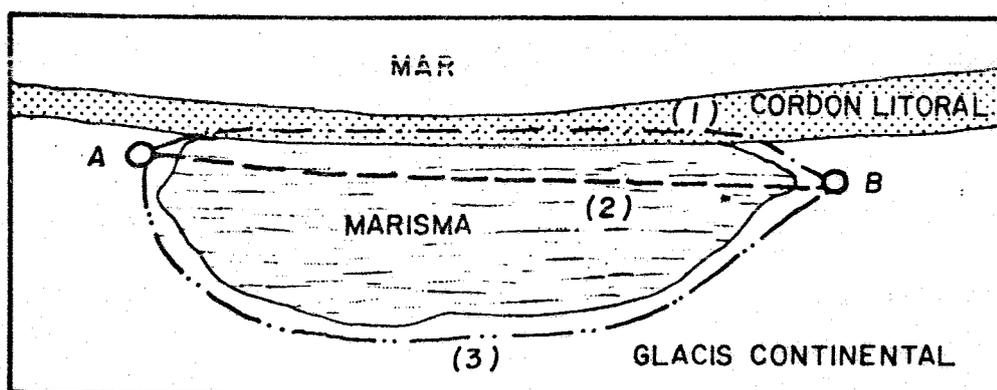


Fig.1.

Esta mejor calidad, unido a otros factores socio-económicos, hace elevar el valor de esa franja de terreno, mientras que el valor del terreno inmediatamente próximo permanece sensiblemente igual.

En el caso límite de este ejemplo, cuando esa faja litoral llegase a la saturación o cuando el coste del terreno alcanzase precios inabordables, no existiría más remedio que construir sobre la zona de marisma o cambiar de región geográfica.

Sería el caso típico de una carretera, donde la necesidad de unir origen y destino por el camino más corto obligaría a: (1) pasar por zonas de elevado coste donde las expropiaciones ocasionarían problemas socio-económicos; (2) pasar por zonas de mala calidad geotécnica; (3) no elegir el camino más corto y dar un rodeo con el considerable incremento de coste.

Así pues, el bajo precio de estos suelos, la imposibilidad física o monetaria de disponer de otros, la posible reserva de suelos de mejor calidad para otros fines etc., hacen que poco a poco, se incrementen las construcciones sobre ellos y por tanto la necesidad de conocer mejor sus propiedades y comportamiento.

En las consideraciones de este artículo, se hará frecuentemente referencia a carreteras o vías de comunicación construidas sobre suelos orgánicos, ya que son casi exclusivamente las construcciones

que pueden soportar las deformaciones del terreno y en las que las cargas transmitidas al suelo son de pequeña magnitud.

## 2.- Definiciones

Se ha englobado bajo el epigrafe de "Suelos orgánicos" a todos - aquellos suelos que contienen un porcentaje importante de materia orgánica de tal manera que ésta condiciona sus propiedades.

Así pues, quedan incluidos desde el suelo puramente orgánico donde el porcentaje de materia orgánica es superior al 90%, es decir la turba, hasta aquellos donde junto con la materia orgánica -- coexisten partículas minerales, es decir arcillas limos y arenas orgánicas.

Si el porcentaje de arcilla limo o arena es importante, son estos componentes los que condicionan el comportamiento del suelo.

A su vez la propia materia orgánica puede presentarse en muy diferentes estados y naturaleza. Hay que pensar que ésta procede de la descomposición de plantas, y tanto el tipo del vegetal originario como el estado de descomposición influye en las características - del suelo orgánico.

Así en el caso de turbas, las hay "de tremedal", constituida por musgos (generalmente del tipo sphagnum), hay "turba de pradera" - (hierbas), "turba marina" (algas marinas) etc. [19] \*

En cuanto al estado de descomposición en que se encuentran los vegetales, se puede encontrar materia orgánica de estructura fibrosa en la que se conserva bastante bien la estructura originaria y la descomposición es muy somera, hasta materia orgánica en la que el proceso de descomposición está muy avanzado, no se reconoce ninguna estructura y el aspecto de la misma es amorfa, viscosa, casi de naturaleza coloidal. [19]

---

\* Los números entre corchetes indican la referencia bibliográfica que se incluye al final del artículo.

### 3.- Origen y formación de los suelos orgánicos

Para una mejor comprensión del proceso de formación de los suelos orgánicos se va a exponer a continuación un breve resumen de la historia y origen de los depósitos de turba o turberas, como caso más representativo de estos suelos.

#### 3.1.- Proceso de formación de una turbera

El fenómeno se produce en las depresiones existentes en regiones de abundante pluviosidad donde se acumula agua formando lagunas permanentes de escaso fondo o en las marismas desarrolladas a partir de albuferas y en los lagos litorales de las llanuras costeras, llanuras aluviales, deltas etc. [18] [23]

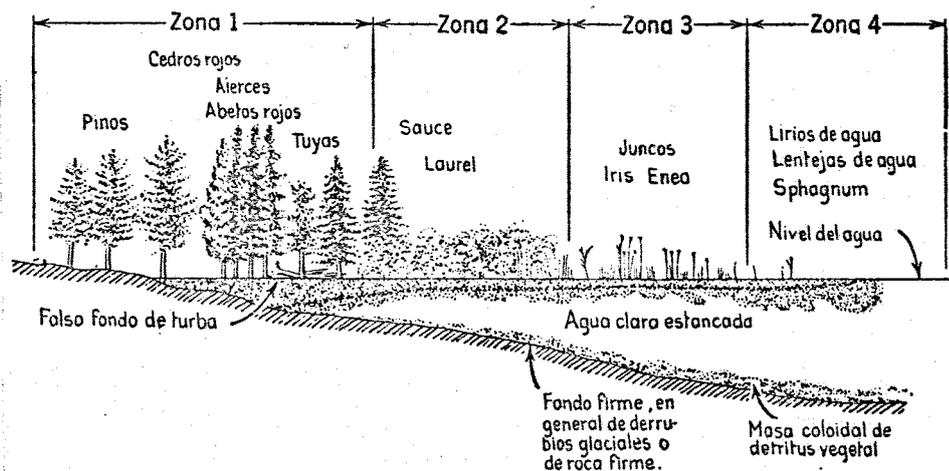


Fig. 2 — Sección transversal de una turbera en la que se observan zonas vegetales entre la orilla y las aguas libres. La zona 1 está caracterizada por árboles de pantano; la zona 2 por arbustos altos; la zona 3 por juncos y la zona 4 por plantas hidrófitas flotantes. El falso fondo de vegetación de turbera con musgos del género Sphagnum se extiende hacia el lago.

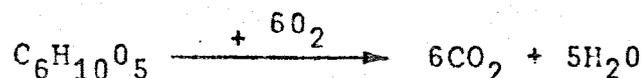
[Tomada de la Ref. 10]

En ellas se desarrolla una vegetación especial de plantas herbáceas (lirios de agua, ciperáceas, juncos, musgos sphagnum, etc.) que al acumularse en el fondo, dan lugar a la formación de masas vegetales en descomposición, cuyo resultado final es la formación de una masa más o menos esponjosa, enriquecida -

en carbono, que se denomina turba. Lo más característico de una turbera es la presencia de un estrato flotante de vegetación, que va invadiendo poco a poco la laguna, desde las margenes hacia el centro. Fig. 2. Por debajo de esta masa vegetal flotante, el agua estancada presenta un color oscuro y frecuentemente una marcada acidez [10]. Con el tiempo, el falso fondo de la vegetación flotante se aproxima al verdadero, y al aumentar el espesor de la masa de turba, llega a desaparecer el lago.

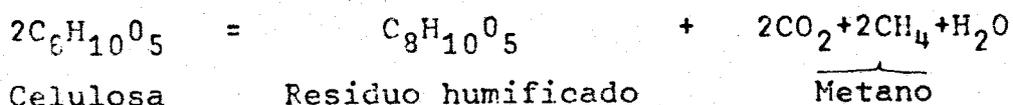
En una turbera, la vegetación sigue proliferando en la parte superior, mientras que en el fondo continúa el proceso de descomposición y formación de turba. [10][23]

El proceso de parcial descomposición de las plantas es como sigue [18] ; Los restos de las plantas muertas son atacadas a la vez por bacterias y hongos, que en presencia de la luz solar y oxígeno, hacen desaparecer la celulosa, substancia básica de todas las plantas, produciendo al final anhídrido carbónico y agua:



Pero en las aguas estancadas, tales como charcas y ciénagas, el grado de putrefacción está limitado por la escasez o ausencia de oxígeno y por la aparición de ácidos orgánicos antisépticos, los cuales inhiben las actividades bacterianas. Bajo tales condiciones los restos de plantas ablandados y finalmente macerados se transforman en un humus pardo y gelatinoso. Parte de esta materia empapa las células de los fragmentos de madera, cortezas, raíces, ramas, etc., las cuales van siendo "humificadas" también, y sus estructuras celulares con frecuencia se conservan maravillosamente en tales restos. Todos los productos humificados, juntamente con los materiales menos destructibles, tales como las resinas y las cubiertas cerosas de granos de polen y esporas, se acumulan y forman los depósitos de turba.

El proceso de humificación enriquece los residuos en carbono, como indica la ecuación siguiente, la cual representa de un modo aproximado los cambios químicos que se efectúan en aquél:



El metano, más familiarmente conocido con el nombre de gas de los pantanos, es muy inflamable y sus pálidas llamas son las causas de los "fuegos fatuos" que ocasionalmente se ven flotar sobre la superficie de algunas ciénagas.

Los climas templados y húmedos favorecen la formación de turba. Los húmedos y calientes tropicales, activan el crecimiento de las plantas, pero también su agotamiento, de modo que los pantanos tropicales contienen poca turba.

Los climas fríos, por otra parte, retrasan el crecimiento de las plantas y, por lo tanto, limitan su espesor. La formación de la turba depende pues del balance entre la velocidad de crecimiento de las plantas y la de la descomposición de las mismas.

### 3.2.- Evolución de los depósitos turbosos

Los depósitos turbosos que permanecen en la actualidad, son geológicamente recientes, es decir cuaternarios.

La historia posterior al momento de su formación está íntimamente ligada con la localización de la turbera como más adelante se verá, y varía de una zona a otra y dentro de una misma localización.

Como es imposible hacer una generalización del proceso evolutivo de estos depósitos, se exponen a continuación unas ideas

sobre dicho proceso para determinadas turberas, algunas de --  
éllas estudiadas por el autor.

De antemano se quiere hacer hincapie en la importancia que -  
tiene la historia de los depósitos turbosos sobre sus propie-  
dades mecánicas con vistas a implantar sobre ellas una cons-  
trucción. La existencia de dos niveles arenosos por encima y  
por debajo de un suelo orgánico puede contribuir a una mejora  
de sus propiedades mecánicas con el tiempo, al facilitar el -  
drenaje y, por tanto, su consolidación.

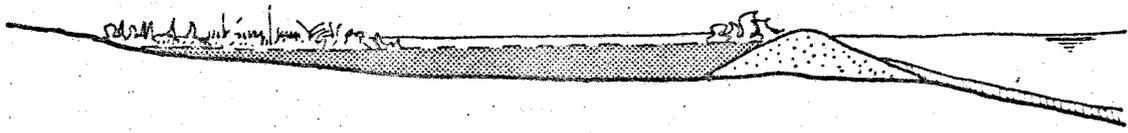
### 3.2.1.- Zonas de albuferas en llanuras costeras

La albufera se produce generalmente en una costa en perio-  
do de emersión. Por la escasa profundidad del mar en las  
proximidades de la costa, detrás de las rompientes se de-  
positan materiales detríticos, que originan una barra su-  
mergida, la cual al sobresalir del nivel del mar, por el  
proceso general de elevación de la costa, dará lugar a un  
cordón litoral o restinga, que aísla una cierta extensión  
de agua. Las albuferas tienden a desaparecer por los --  
aportes de sedimentos procedentes del mar y de los ríos -  
que en éllas desembocan. [23]

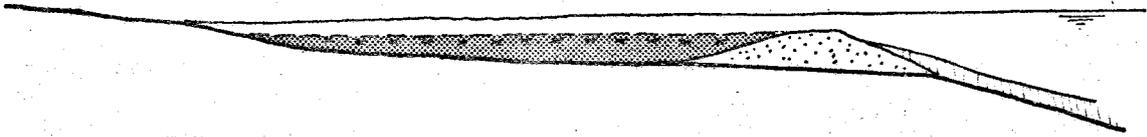
Si las condiciones hidráulicas lo permiten y esa depre-  
sión se rellena de agua dulce puede comenzar a desarrollar  
se una abundante vegetación en la marisma resultante. -  
Fig. 3(a). Comienza la formación de una turbera.

Si el nivel del mar se eleva súbitamente se produce una -  
invasión de la turbera por agua salada que destruye las -  
plantas existentes y da lugar a una sedimentación de are-  
nas y fangos marinos, Fig. 3(b y c).

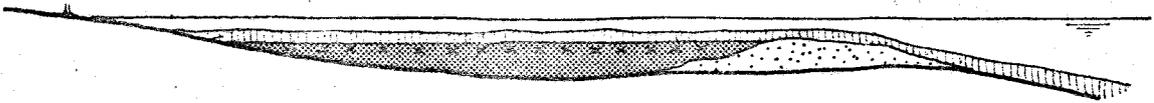
El siguiente paso podría ser la formación de una nueva ba-  
rra costera y se repetiría el proceso descrito inicialmente.



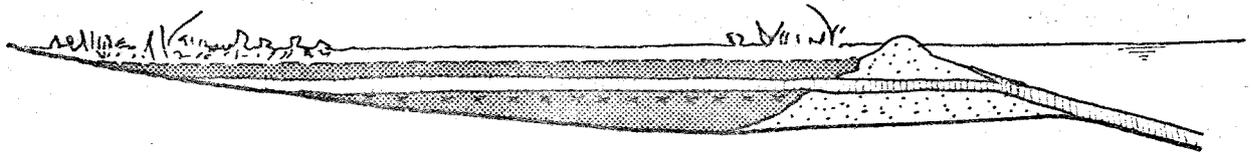
(a) El cordón litoral de dunas da lugar a la formación de una marisma costera donde comienza a formarse una turbera.



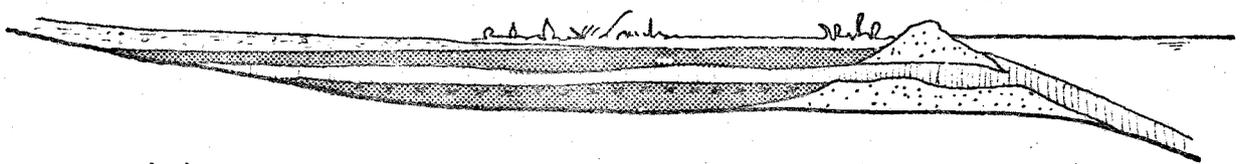
(b) Se produce una invasión del mar.



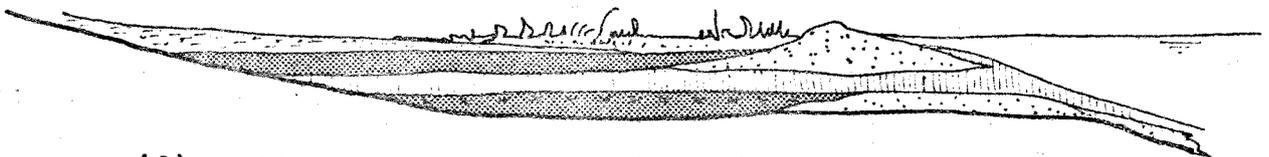
(c) Sedimentación de arenas y fangos marinos.



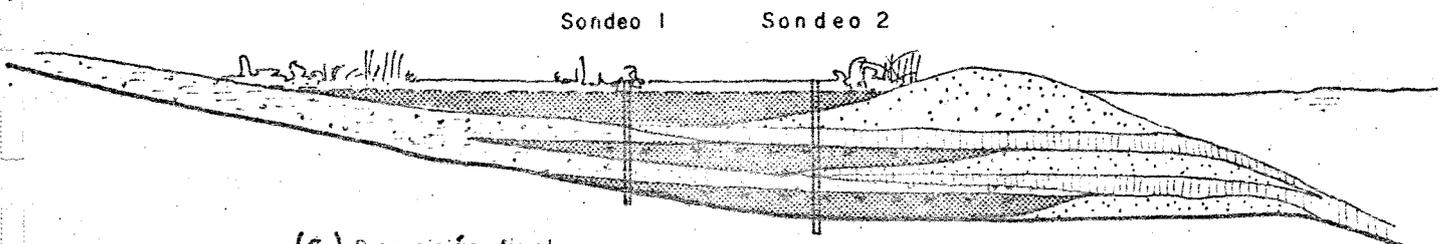
(d) Repetición del proceso debido a una elevación de la costa y formación de un nuevo cordón litoral



(e) Sedimentación de aportes continentales.



(f) Idem (e) con el segundo cordón litoral desplazado.



(g) Disposición final

Fig. 3. Formación de turba en zonas de albuferas

Fig. 3.(d,e,f). En la Fig. 3.(e) se ha indicado el proceso de sedimentación por aportes continentales en arcillas y limos.

Un esquema de la disposición final se indica en la Fig. 3 (g).

Si se perforasen dos sondeos de reconocimiento en los sitios indicados en la Fig. 3.(g) darían probablemente los registros que se adjuntan.

El estudio de estos dos hipotéticos sondeos sugiere los siguientes comentarios:

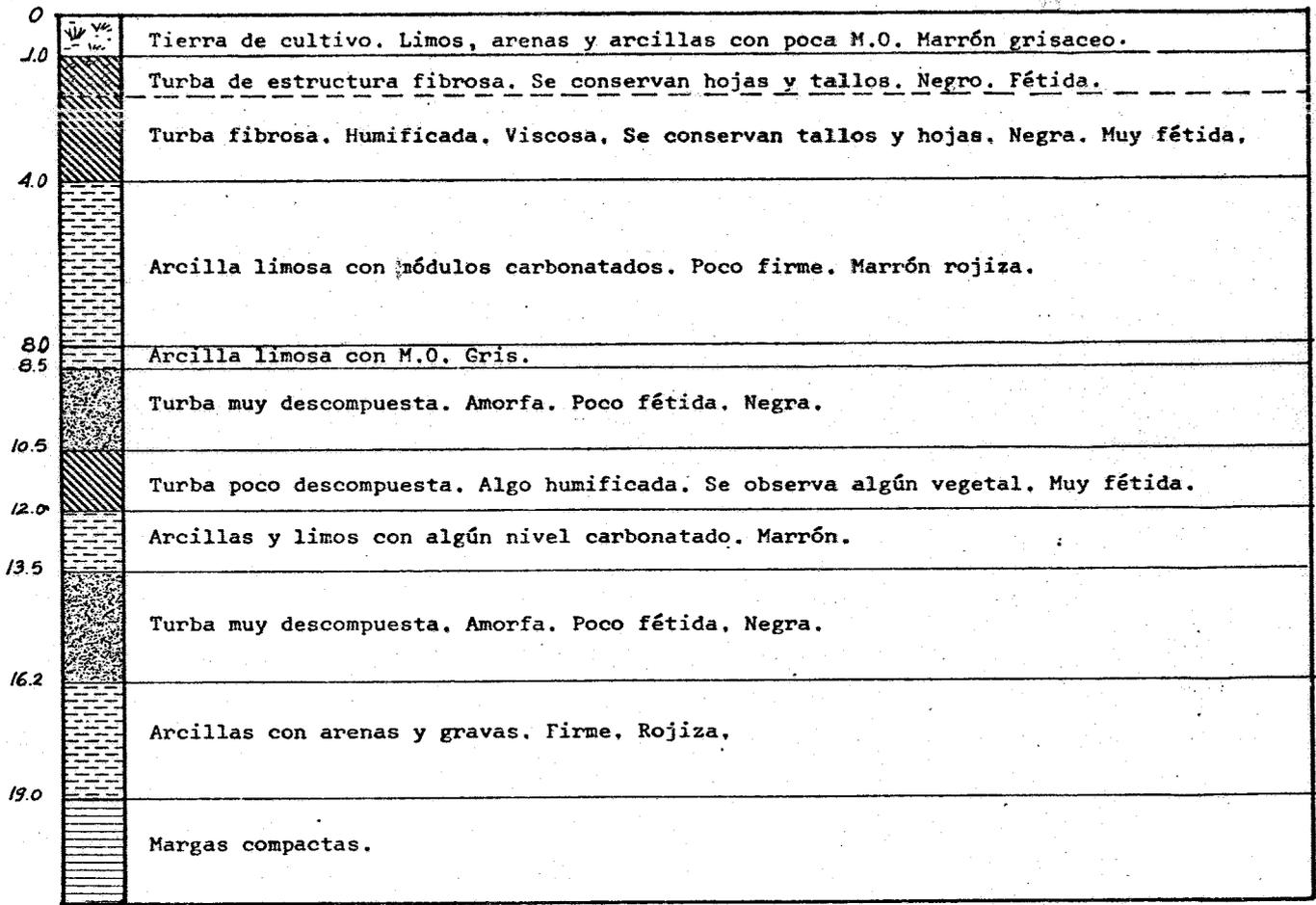
En las zonas más cercanas a la costa antigua, la proporción de niveles de carácter arcilloso es mayor; proceden de los aportes continentales.

En las zonas cercanas a la barra costera predominan los niveles arenosos, bien de carácter marino sedimentario o bien procedentes de las dunas costeras. Puede ser frecuente en estas zonas encontrar la turba íntimamente mezclada con arenas, sobre todo junto al cordón litoral.

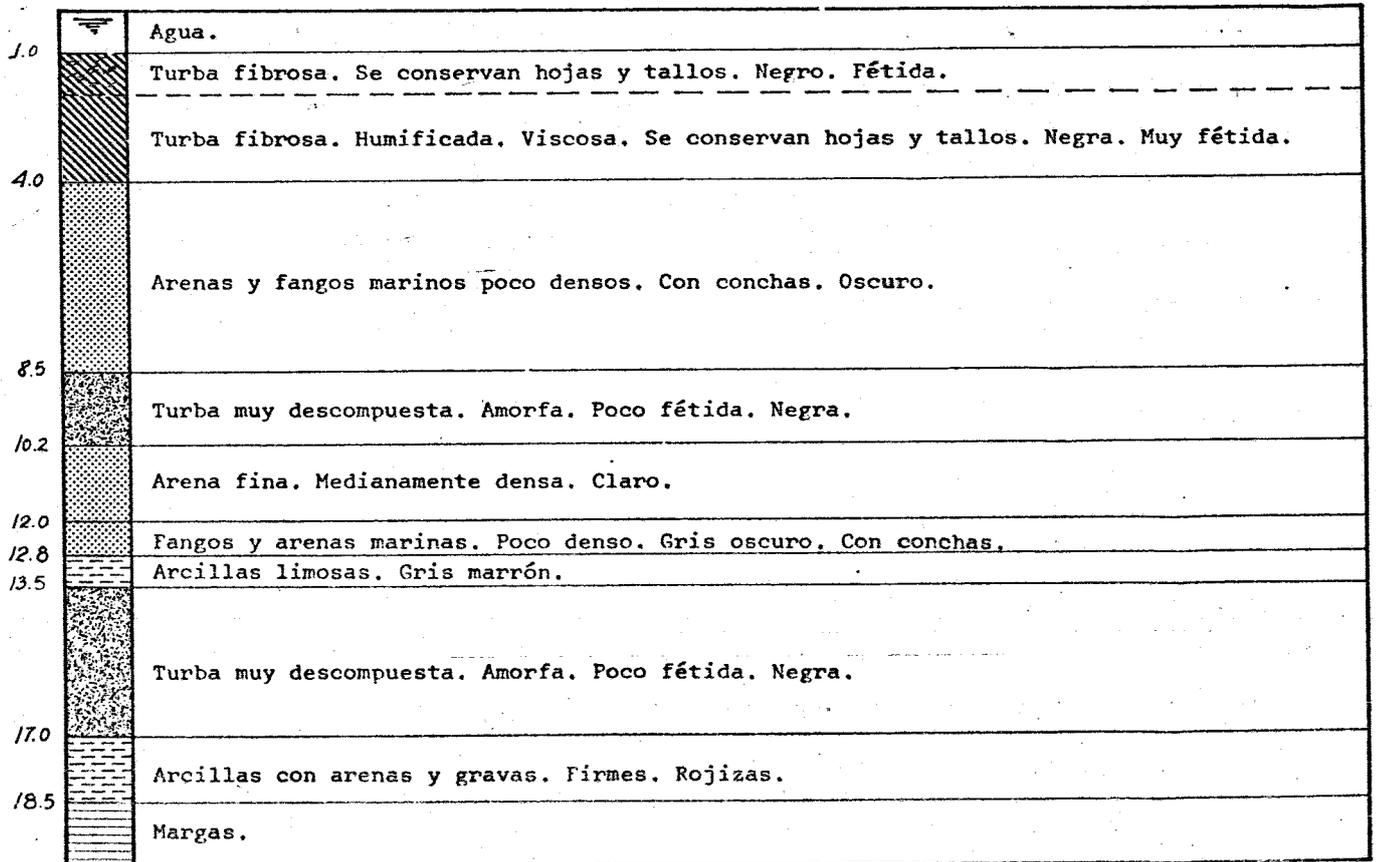
La capa más joven de turba permanece con su estructura fibrosa. Se está produciendo en ella un ataque y descomposición por las bacterias. En la turba inmediatamente inferior el proceso de descomposición ya es más lento y comienza a humificarse. Hay desprendimiento de metano con lo que el olor es bastante fetido.

En los dos niveles turbosos inferiores ha existido una invasión posterior del mar que ha producido la muerte de las plantas y ha acelerado la descomposición de la materia orgánica al menos hasta una determinada profundidad. Se ha representado en las figuras con unas líneas de cruces.

SONDEO 1 (más alejado del mar)



SONDEO 2 (más cercano al mar)



Disposiciones semejantes a éstas se han encontrado en la mayor parte de las marismas procedentes de antiguas albuferas de la costa levantina, con la salvedad de que en ellas solo existen uno o dos niveles turbosos a lo sumo, [29][30][31][32]. Procesos similares parecen haberse producido en las turberas costeras de la región de Normandía en Francia [40]. Realmente, la extinción de las albuferas ha ocurrido hace relativamente poco tiempo, geológicamente hablando. En algunas cartas antiguas del siglo XVIII, [15] figuran las albuferas de Castellón de la Plana, la de Valencia llegando hasta la montaña de Cullera estando unida ésta a la costa por un pequeño istmo; las de Jaraco-Gandía, etc.

### 3.2.2.- Zonas de albuferas en costas acantiladas

Aunque el proceso histórico de formación y deposición de los distintos niveles es análogo al descrito en el punto 3.2.1., existe una pequeña diferencia motivada por la existencia primitiva de la costa acantilada, que se ha esquematizado en la Fig. 4.

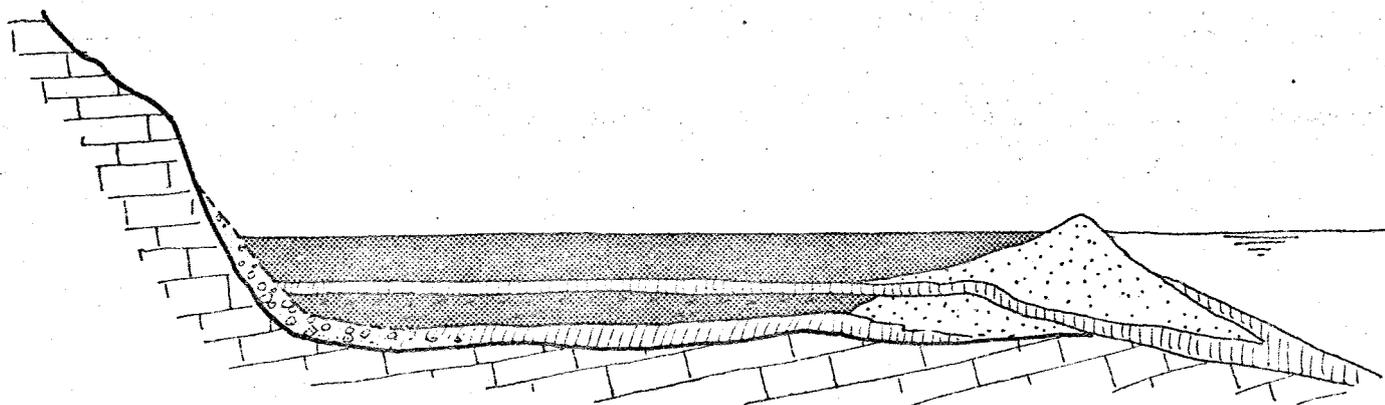


Fig. 4. Formación de turba en albuferas en costas acantiladas.

Es decir se caracteriza por una mayor ausencia de niveles arcillosos así como un mayor espesor de suelos orgánicos

junto al borde continental cosa que no ocurría en los casos anteriores del punto 3.2.1.

Esta disposición ha sido encontrada por el autor en el borde Montañoso de la marisma Levantina entre Jeresa y Canda [29].

### 3.2.3.- Marismas en las vegas de los ríos

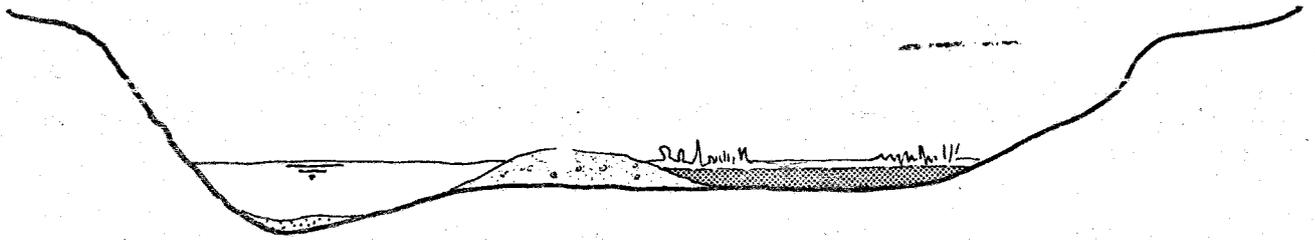
En el "curso bajo" de los grandes ríos, estos pierden su acción erosiva y sus cauces divagantes discurren por amplios valles que en momentos de fuertes avenidas, pueden inundarse en grandes extensiones. [23].

La formación de un depósito de suelo orgánico en la vega de estos ríos puede corresponder al esquema de la Fig. 5.

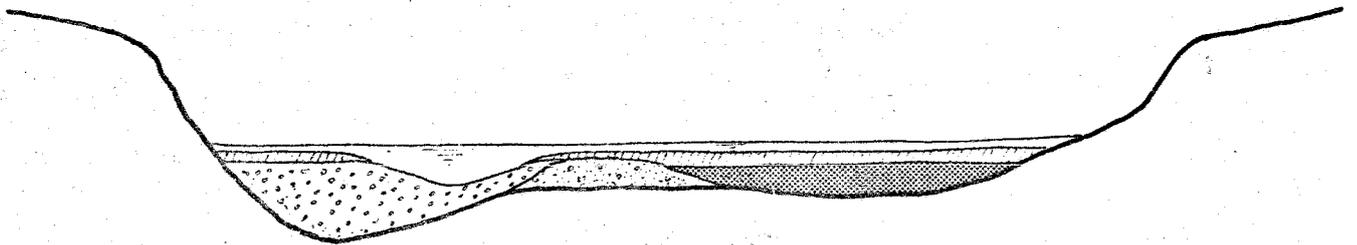
Las características de estos depósitos turbosos, de las vegas de los ríos, son fundamentalmente una mayor preponderancia de niveles limosos, arenosos e incluso de gravas, sobre los de carácter arcilloso, que pueden incluso no existir. Por otra parte y comparando con las de los puntos anteriores, aquí no ha habido agua salobre invadiendo la marisma por lo que el proceso de descomposición es un grado menor.

Este caso se ha encontrado en el curso bajo del Río Ebro entre Tortosa y Amposta. En sondeos realizados en dicha vega se han detectado depósitos turbosos de potencia apreciable y con intercalaciones de niveles limosos y arenosos [33].

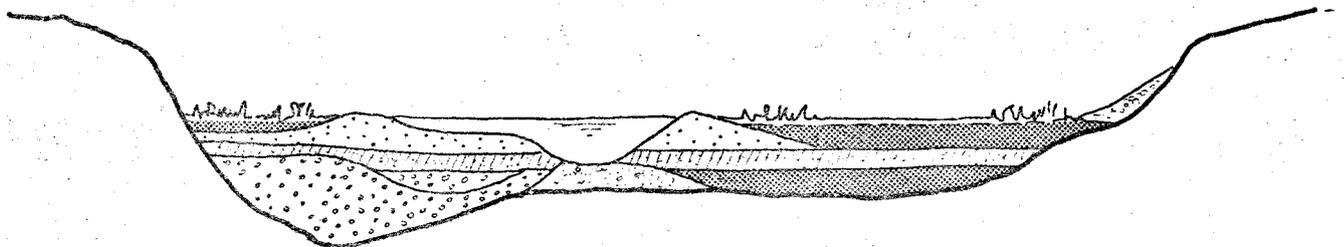
La estructura de la turba es fibrosa con restos de tallos y hojas perfectamente visibles y en un estado de humidificación variable con la profundidad. El conjunto total de suelo orgánico llega en algún punto a los 20 metros de potencia.



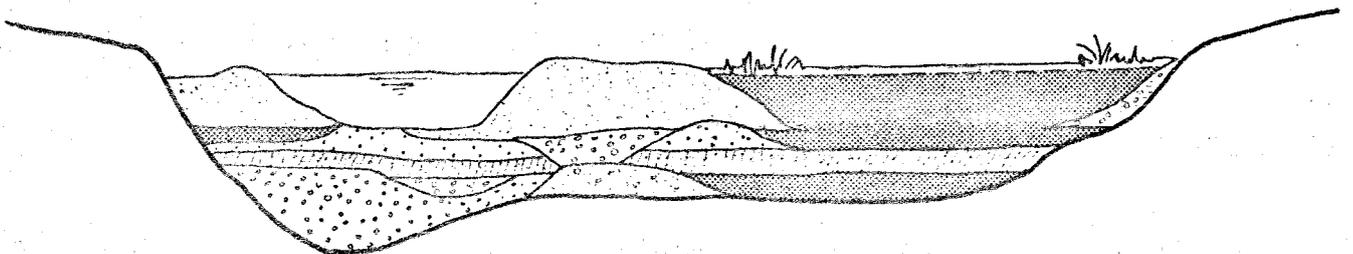
(a) Formación de un dique que deja aislada una laguna donde se inicia una turbera.



(b) Elevación del nivel del río. Sedimentación de gravas, arenas y limos.



(c) Nueva formación de diques, que aíslan nuevas zonas. Se deposita un coluvión en la margen derecha.



(d) Disposición final.

Fig. 5. Formación de turba en la vega de un río.

En la parte baja del Guadalquivir se produce un hecho parecido aunque en este caso las oscilaciones del nivel del mar provocan la inundación frecuente y sistemática de la marisma impidiendo la formación de verdaderas turbas.

#### 3.2.4.- Zonas de deltas

La formación y evolución de un depósito de turba en una llanura deltaica puede ocurrir como se indica en el esquema de la Fig. 6 [28].

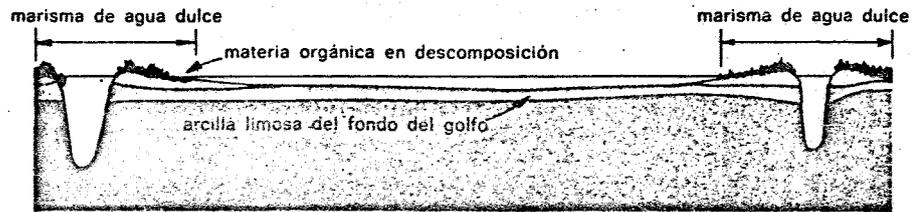
En estas formaciones coexisten las marismas de agua salobre y de agua dulce donde se va depositando en menor o mayor grado el suelo orgánico. Las características de la turba varían no solo en profundidad sino lateralmente. Son frecuentes los niveles arenosos interestratificados con aquélla.

El delta del Ebro es un ejemplo típico de estas zonas.

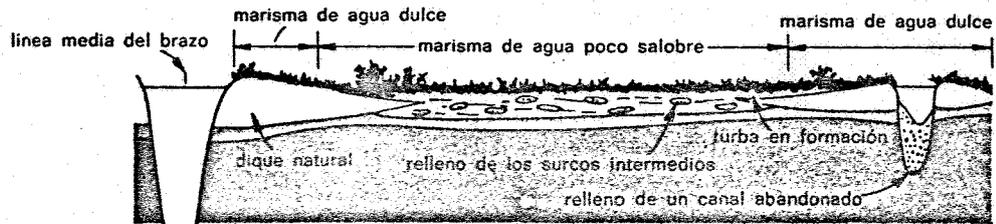
#### 3.2.5.- Lagos interiores de agua dulce (paulares o tremedales)

Se engloban aquí los depósitos orgánicos depositados en lagos interiores producidos en depresiones del terreno, o de origen glaciario etc. En general la condición para que se inicie la formación de turba es la poca profundidad del lago, por lo que esta comienza en los bordes, avanzando hacia el centro.

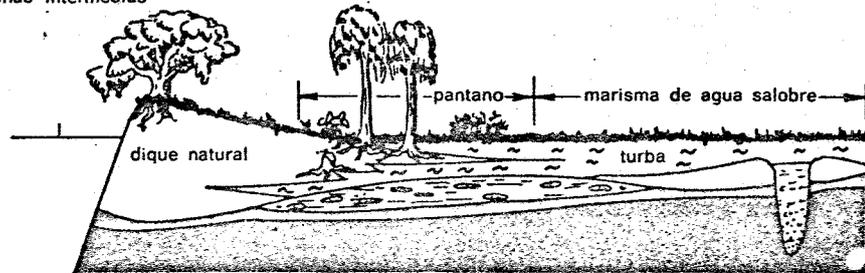
En los lagos grandes y profundos los sedimentos son arcillas finas mezcladas de ordinario con algunos restos orgánicos procedentes principalmente, del plancton y necton que viven en aguas más altas [10]. En ellos no se forma una verdadera turba.



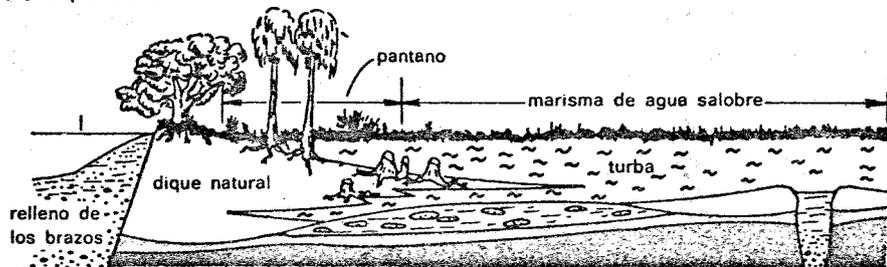
(A) desarrollo inicial de los brazos y zonas intermedias



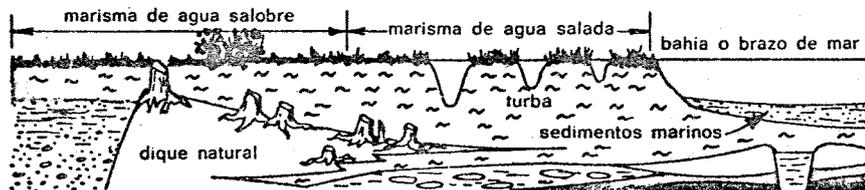
(B) ampliación del brazo principal y de sus diques naturales — creación de marismas en las zonas intermedias



(C) desarrollo máximo del brazo y de sus diques naturales — formación de pantanos al hundirse el dique natural



(D) abandono del canal — avance del pantano sobre los diques que se hunden



(E) subsidencia continua con destrucción parcial de las marismas

Fig. 6 Etapas de la acumulación de turba en una llanura deltaica. (Tomado de H. N. Fisk, en H. R. Gould y J. P. Morgan, *Geological Society of America Field Trip Guidebook for 1962 Annual Meeting*, publicado por la Houston Geological Society.)

[Tomada de la Ref. 12]

En las turberas de lagos interiores de bajo fondo donde no hay aporte prácticamente de sedimentos minerales, se forma turba en toda la profundidad, y es en estos sitios donde se localizan los más importantes yacimientos de este material.

La evolución con el tiempo se traduce en distintos niveles de turba diferentes según los vegetales que la originan.

Si se trata de depresiones en proceso de subsidencia, la acumulación de restos vegetales continua indefinidamente mientras las condiciones climáticas sean favorables, y pueden acumularse enormes espesores de turbas. Como ejemplo basta citar la turbera del El Padul, al sur de Granada, donde un sondeo efectuado, ha atravesado un espesor de turba de 100 m [23].

#### 4.- Propiedades físicas de la turba

Dada la complejidad que supone estudiar las combinaciones posibles entre arcillas, limos, arenas con partículas orgánicas se va a comentar tan solo las propiedades derivadas de la presencia de materia orgánica. Y para ello se hará referencia solo de los suelos marcadamente orgánicos: las turbas.

##### 4.1.- Consideraciones previas

Antes de entrar a dar unas orientaciones sobre las características de las turbas, conviene resaltar unos aspectos que son de la mayor importancia.

En primer lugar está el hecho de la marcada heterogeneidad existente dentro de un mismo depósito turboso, en donde tanto en profundidad como lateralmente se pueden encontrar diferentes tipos de estructuras turbosas.

En segundo lugar el hecho de que se está analizando un suelo en cuyo esqueleto intervienen partículas orgánicas, frecuentemente de gran tamaño. Por tanto, no pueden ser representativas las muestras de tamaño convencional que se obtienen comúnmente en el reconocimiento de suelos. Así, se ha visto, por citar un ejemplo, que el contenido de humedad inicial de una muestra de suelo colocada en la célula edométrica, era hasta tres veces mayor que el contenido de humedad de otra porción de suelo situada unos centímetros más arriba, procedente del mismo tomamuestras.

Otro problema que se plantea al querer determinar las características geotécnicas de estos suelos orgánicos, es la garantía de la inalterabilidad en el proceso de toma de muestras. Se comprenderá que obtener una muestra inalterada de un suelo con elevadísimos porcentajes de agua y extremadamente deformable requiere un proceso altamente complicado y que frecuentemente no se consigue.

Estas consideraciones son a veces la explicación a las dispersiones existentes cuando se quieren establecer determinadas correlaciones.

#### 4.2.- Estructura

Un suelo turboso está formado por un agregado de partículas orgánicas procedentes de fibras vegetales en mayor o menor estado de descomposición, y en menor proporción por partículas inorgánicas (limos, arcillas, etc.).

Los restos de plantas dan lugar a una estructura interna que caracteriza perfectamente a distintos tipos de turba.

MacFarlane y Radforth [2] describen dos tipos extremos de turba y afirman que entre ellas caben todas las gradaciones:

Turbas fibrosas donde la estructura vegetal es bien visible. Se observan perfectamente restos de tallos y de hojas, y entre ellas se desarrolla una disposición estructural secundaria de restos claramente no muy fibrosos. La mayor parte del agua que contienen, está más bien como agua libre que como agua adsorbida.

Turbas granulares amorfas donde las partículas orgánicas son de tamaño coloidal y la mayor parte del agua está adsorbida alrededor de las partículas.

La estructura vegetal de la turba depende de:

- El tipo de vegetal que la originó, el tamaño de sus hojas o tallos etc.
- El estado de descomposición y de humificación en que se encuentre, que como se vió en el apartado 3, viene influido a su vez por:
  - Presencia de hongos y bacterias
  - Profundidad
  - Ataque de aguas saladas o salobres
  - Cambios climáticos, temperatura
  - Acidez de las aguas.

Podría ocurrir por tanto que una determinada turba fibrosa fue se degradándose con el tiempo hacia el estado de las turbas - amorfas, aunque con un efecto de disminución de contenido de materia orgánica.

La mayor parte de las turbas encontradas en el Levante español son fundamentalmente de tipo fibroso.

El tipo de estructura de la turba influye en el proceso de consolidación bajo cargas como se verá mas adelante.

#### 4.3.- Peso específico. Contenido de materia orgánica. Gases

El peso específico ( $\gamma_s$ ) de los suelos turbosos es muy variable por la intrínseca naturaleza orgánica de las partículas.

En las Turberas de la Normandía Francesa se han medido pesos - específicos entre 1,5 y 2,6 T/m<sup>3</sup> [40].

En las turbas de la Vega del Ebro [33] los valores de  $\gamma_s$  encontrados han sido bastante altos,  $\gamma_s = 2,2 - 2,7$  T/m<sup>3</sup>, mientras que en las de las antiguas albuferas de Almenara (Castellón) y en las del Sur de Valencia [29][30] oscila entre  $\gamma_s = 1,54$  T/m<sup>3</sup> para las turbas muy puras y  $\gamma_s = 2,1$  T/m<sup>3</sup> para turbas de menor - contenido de materia orgánica.

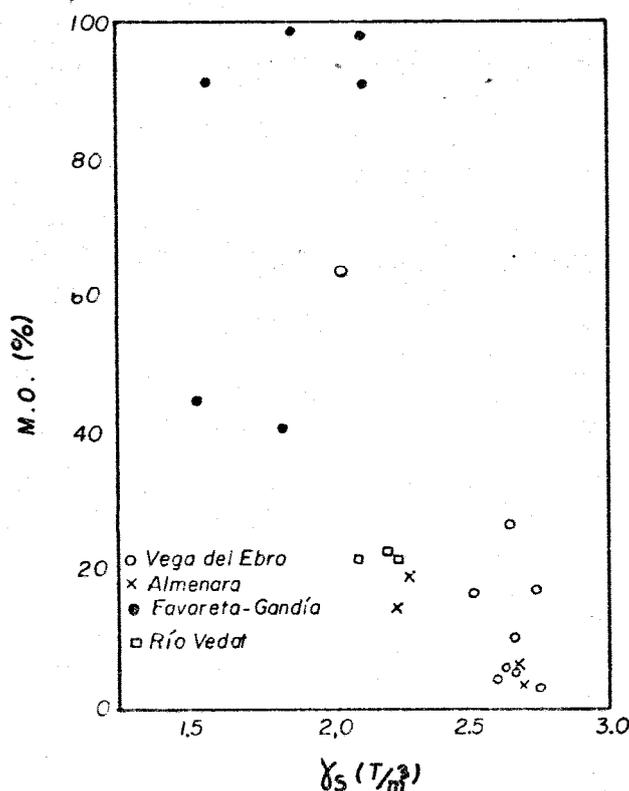


Fig.7. Relación entre el contenido de materia orgánica (M.O) y el peso específico ( $\gamma_s$ ) para turbas del Levante español

En el gráfico de la Fig. 7 se han intentado correlacionar estas características de las turbas levantinas. Aunque la dispersión es bastante importante incluso para una misma región se puede deducir la lógica disminución de peso específico con el

aumento de contenido de Materia orgánica. La dispersión es debida seguramente al hecho comentado en el punto 4.1. sobre la variabilidad de las características dentro de una misma muestra. En muchas de las muestras, el análisis de la materia orgánica se ha realizado sobre una porción de muestra unos centímetros más arriba o abajo que la utilizada para determinar el peso específico.

El peso específico al variar con el contenido de materia orgánica quizás pueda ser un indicio del estado de descomposición de la misma como más adelante parece deducirse.

Es frecuente que la turba contenga aire y gases ocluidos, pero no existe procedimiento estandard para su determinación por lo que se recurre a estimarlo en los ensayos de consolidación. Valores de hasta un 10% no son raros [29]. Hanrahan [16] apunta una cifra de 5% para una turba próxima a una zanja de drenaje.

#### 4.4.- Densidad seca, Humedad

Hanrahan [16] ha encontrado densidades secas de  $\gamma_d = 0'065 - 0'130 \text{ T/m}^3$  observando que ésta aumentaba hasta  $\gamma_d = 0'324 \text{ T/m}^3$  bajo carreteras construídas.

En las turbas Levantinas [29][30][32][33] las densidades secas obtenidas variaban logicamente con el contenido de humedad. En la Fig. (8) se ha dibujado esta correlación. La mínima densidad seca encontrada ha sido de  $\gamma_d = 0'106 \text{ T/m}^3$  aunque para un contenido de humedad no excesivamente elevado.

La humedad de las turbas constituye una de sus principales características pues está íntimamente ligada con la compresibilidad.

En general una turba con contenido apreciable de materia orgánica debe tener una humedad importante. En el Levante español

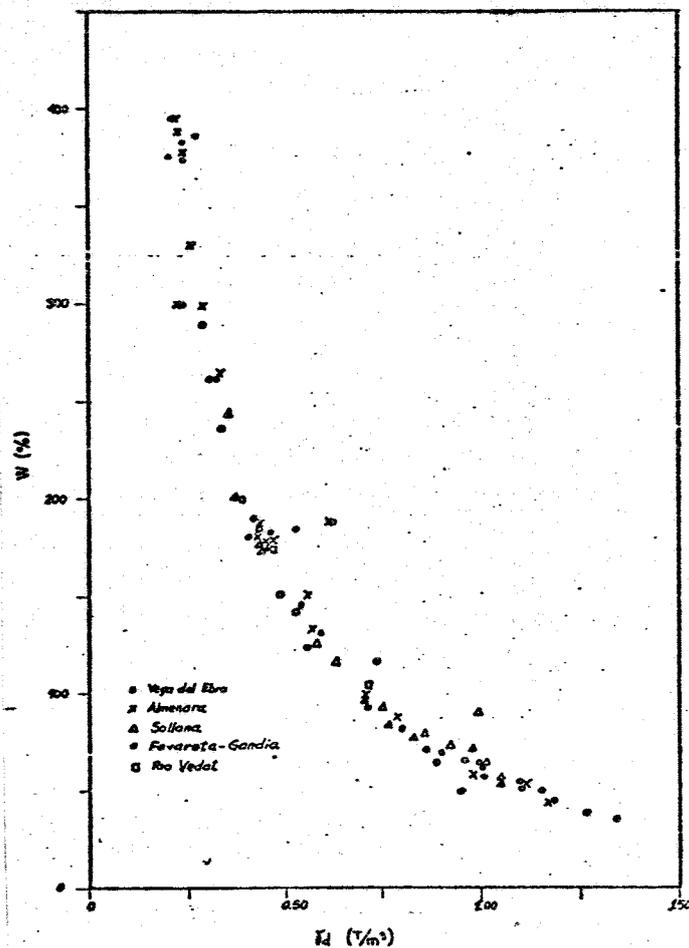


Fig. 8. Relación entre humedad ( $W$ ) y densidad seca ( $\gamma_d$ ) para turbas del Levante español

la máxima humedad medida por el autor ha sido de 742% [29]; en la Normandía Francesa se han encontrado valores de casi 1000% [40], Casagrande [8] resume en la tabla I, que se incluye más adelante, algunas cifras del contenido de humedad, obtenidas en distintos depósitos turbosos.

Del estudio de la curva de la Fig. 8 se podría sacar la conclusión de que el peso específico de esos suelos es casi constante, ya que la curva dibujada encaja muy bien con casi todos los puntos, es decir es casi única.

La correlación  $W - d$  viene regida por la expresión

$$W = \gamma_w \cdot S_r \left( \frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right)$$

donde  $\gamma_w$  es el peso específico del agua y  $S_r$  el grado de saturación. Admitiendo un  $S_r$  medio observado de un 92%, resulta --

$$\gamma_s = 2,6 - 2,7.$$

Si bien esto puede ser cierto para  $W$  bajos y  $\gamma_d$  altos, es decir para turbas pobres, no tiene por que serlo para turbas muy puras, ya que la variación de  $\gamma_s = 2,6$  a  $\gamma_s = 1,5$ , por ejemplo, no es perceptible en la rama asintótica vertical de la curva.

En la Fig. 9 se ha dibujado la posible correlación entre el contenido de humedad  $W$  y el peso específico de las partículas  $\gamma_s$  para las turbas Levantinas.

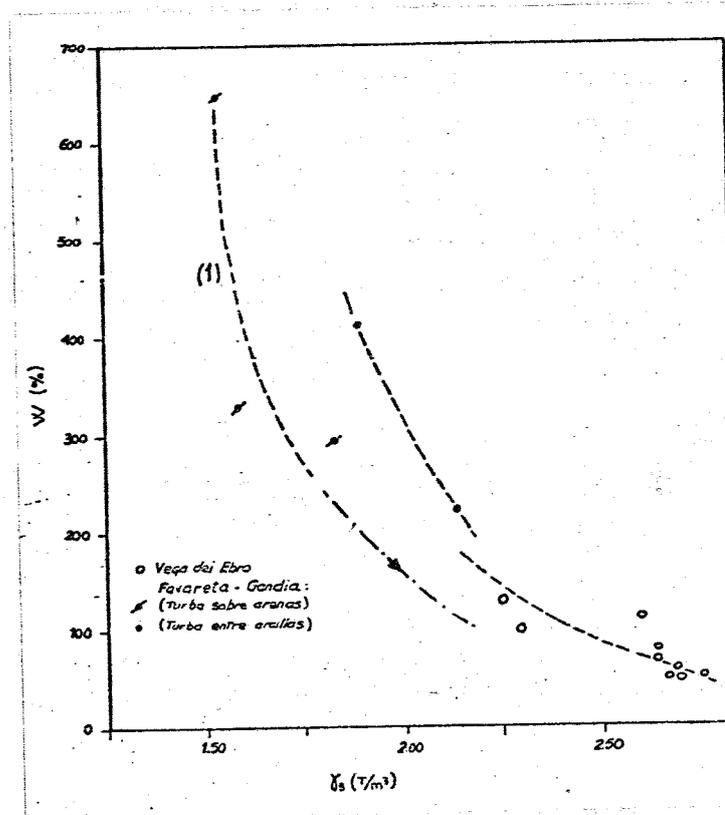


Fig.9. Relación entre humedad ( $W$ ) y peso específico ( $\gamma_s$ ) para turbas del Levante español

De antemano hay que lamentar que se disponen de muy pocos datos fidedignos del peso específico y que por tanto, las correlaciones dibujadas no pasan de ser una mera especulación. Sin embargo hay un detalle que puede ser interesante. Se ha extrapolado hacia abajo la curva de los puntos (1), correspondientes a muestras de turbas depositadas encima y entre arenas. -

Para un mismo peso específico, p.e.  $\gamma_s = 2 \text{ T/m}^3$ , resultaría que estas turbas contienen menos cantidad de agua que las turbas depositadas entre arcillas. Teniendo en cuenta que la edad de ambas turbas es la misma y que el peso específico puede, de algún modo, calificar las partículas orgánicas o su estado de descomposición, resulta que una misma turba (misma edad y  $\gamma_s$ ) se ha consolidado más por el hecho de estar entre niveles arenosos que de estar entre arcillas, lo que en principio parece lógico.

Como dato que confirma la posibilidad de existencia de gases en la turba, se anota que el grado de saturación medio en las turbas Levantinas, no llega al 95% incluso para turbas a unos 10 m de profundidad.

#### 4.5.- Compresibilidad, índice de poros

Independientemente de un comentario más amplio sobre la consolidación de estos suelos que figura en el punto 4.9, se van a exponer ahora algunos datos sobre el coeficiente de compresibilidad  $C_c$  y el índice de poros  $e$ .

El coeficiente de compresibilidad viene definido por

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1}$$

correspondiente a la curva edométrica de 1 día de duración.

En la Fig. 10 se han situado los valores del coeficiente de compresibilidad  $C_c$  y del contenido de Humedad, para las turbas Levantinas. Según algunos autores [40], existe una correlación entre las propiedades físicas y la compresibilidad. Para el contenido de humedad podría ser  $C_c = \frac{W}{100}$

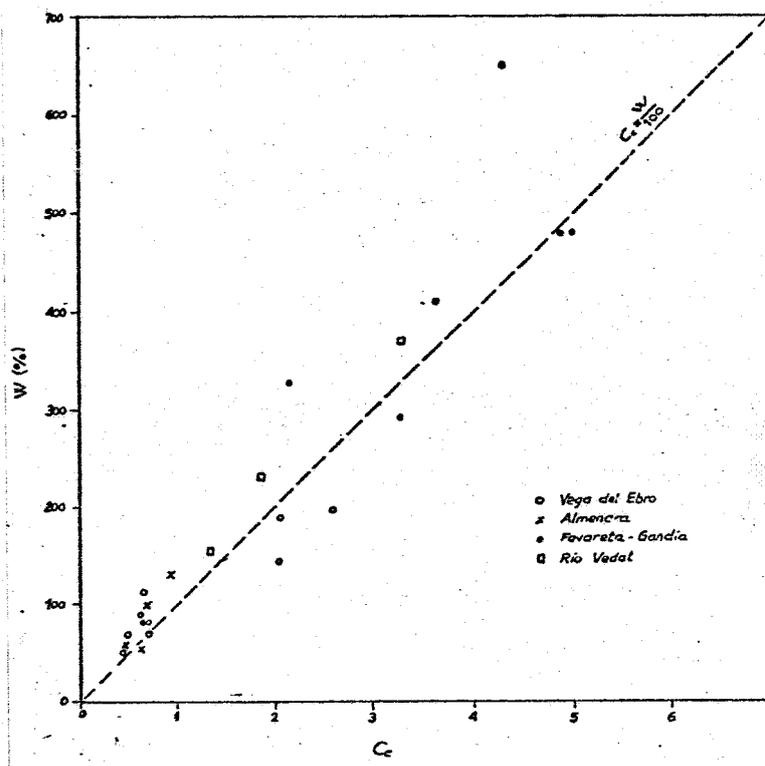


Fig.10. Relación entre el contenido de humedad (W) y el coeficiente de compresibilidad ( $C_c$ ) para turbas del Levante español

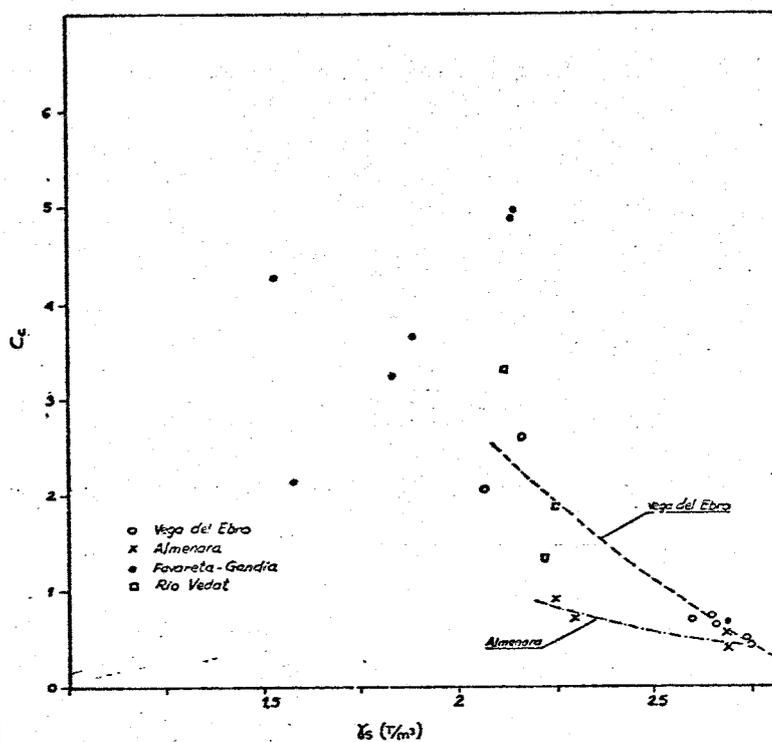
Esta recta se ha dibujado en el gráfico y parece que los puntos situados se ajustan con mayor o menor exactitud, aunque podría incurvarse ligeramente hacia arriba a partir de  $C_c > 3$ . Un resultado similar parece haberlo encontrado Vautrain [40] en las turbas de La Vallée des Aulnes en Normandía.

El índice de poros varía con el peso específico de las partículas de manera análoga a como varía la humedad aunque en esta relación las dispersiones encontradas han sido mayores y se tienen pocos datos para este grado de desviaciones.

Se han encontrado en el Levante índices de poros de hasta 10,74 para turbas con 96% de materia orgánica y humedades de 650%. Hanrahan [16] cita índices de poros de hasta 25.

Las turbas depositadas sobre y entre arcillas, en comparación con las depositadas sobre arenas, para un mismo índice de poros, muchas tienen un mayor peso específico, y posiblemente se pudiera extrapolar que para un mismo  $\gamma_s$  tienen un mayor índice de poros, lo que indica que están menos consolidadas.

En la Fig. 11 se correlaciona el índice de compresibilidad con el peso específico, que lógicamente tiene el mismo aire que la relación  $W - \gamma_s$ . Se puede hacer notar que para pesos específicos altos, mayores de 2,25, parece existir una cierta relación tal que disminuye notablemente el coeficiente de compresibilidad con el aumento de peso específico. Pero para pesos específicos pequeños esta correlación no es evidente, si bien se vuelve a reconocer la falta de suficientes datos.



#### 4.7.- Permeabilidad

Otra de las principales características que definen los suelos orgánicos es su permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad se determina en un permeámetro o en un ensayo de consolidación.

En los ensayos realizados por diversos autores [2/] [16] [5] [6] se ha podido ver que la permeabilidad de los suelos turbosos varía enormemente con la magnitud y duración de la carga.

Así, Hanrahan [16] cita los siguientes datos experimentales del índice de poros ( $e$ ) y coeficiente de permeabilidad vertical  $K_v$  (cm/s), de un ensayo realizado con muestras de turba parcialmente humificada, tomadas junto a una zanja de drenaje:

	( $e$ )	$K_v$ (cm/s)
Antes del ensayo	12	$4 \times 10^{-4}$
Dos días después de estar bajo una carga de $0'56 \text{ k/cm}^2$	6,75	$2 \times 10^{-6}$
Siete meses después de estar bajo una carga de $0'56 \text{ k/cm}^2$	4,50	$8 \times 10^{-9}$

Es decir, después de 7 meses así cargada, la turba es 50.000 veces menos permeable que inicialmente.

En la Fig. 12, tomada de Berry and Vickers [6], se puede ver la disminución del coeficiente de permeabilidad vertical observada en un ensayo de consolidación, para distinta relación: presión final / presión inicial. Como se aprecia, la permeabilidad final es del orden de unas 1.000 veces más pequeña que la inicial para relaciones  $P_f / p_o$  altas; para  $P_f / p_o < 6$ , la disminución de permeabilidad es menos acusada.



#### 4.8.- Resistencia al esfuerzo cortante

La resistencia al esfuerzo cortante puede determinarse con ensayos de compresión simple o de compresión triaxial.

La resistencia a la compresión simple de los suelos turbosos es extremadamente pequeña.

En la determinación de la misma existe un problema debido a la gran deformación que experimenta la probeta, llegando en algún caso aislado a no poder discernir perfectamente la rotura. Hay que tener en cuenta que la turba posee una consistencia próxima a la de un líquido.

Los valores de la resistencia a compresión simple medidos en las turbas Levantinas oscilan de  $q_u = 0'060 \text{ k/cm}^2$  para turbas poco consolidadas y con contenidos de humedad superiores a 280%, y del orden de  $q_u = 0'350 \text{ k/cm}^2$  para turbas algo sobreconsolidadas y con contenidos de humedad entre 50 y 100%. El módulo de elasticidad tangente al 50% de la carga de rotura para estas turbas oscila de 1 a 10  $\text{k/cm}^2$ .

Hanrahan [16] cita valores similares, dando además cifras de  $q_u = 0'7 \text{ k/cm}^2$  para alguna turba más o menos consolidada bajo una carretera.

En la realización de ensayos de compresión triaxial, se topa con la dificultad de la heterogeneidad de las muestras ya comentado anteriormente.

Es difícil tallar tres probetas de tamaño convencional de una misma muestra de turba que representen un mismo estado de ésta.

De todas formas cuando se ha conseguido, se ha visto que las turbas con contenidos elevados en materia orgánica son puramente cohesivas.

La propia dificultad de tallar probetas en estos suelos orgánicos, hace que se recurra frecuentemente a determinar la resistencia con el scisómetro. En este caso, suele utilizarse una cabeza con aspas de gran tamaño que puedan hacer que el resultado sea representativo de un suelo con una macroestructura interna.

En la tabla I [26] se presenta una correlación entre la resistencia al esfuerzo cortante y el contenido de humedad para diversas turbas. La mayor parte de las cifras corresponden a ensayos con scisómetro.

Tabla I (Tomada de la Ref. 26)

Resistencia al Esfuerzo Cortante en Turbas

Referencia	Localización de la turba	Resistencia al esfuerzo cortante (T/m <sup>2</sup> )	Contenido natural de agua (%)
Andersen y Hempstock (Ref. 3)	Canadá (Alberta)	0.50-1.25	700-1400
Casagrande, A. y L. (Ref. 9)	E.E.U.U. (Mass.)	0.50-1.85	230- 750
		0.35-2.90	400- 800
		1.35	400- 550
		0.35-0.95	250- 380
		5.00 (1)	110
Dücker (Ref. 13)	Alemania (Holstein)	0.10-5.00 (1)	400- 800
Fraser (Ref. 14)	Irlanda del Norte	1.40-2.80	680-1450
Hardy y Thomson (Ref. 17)	Canadá (N.O.)	0.50-3.00	470- 760
Lea y Brawner (Ref. 20)	Canadá (Alberta)	0.55-1.50	No hay dato
Margason y Fraser (Ref. 22)	Irlanda del Norte	1.70	790
Moos y Schneller (Ref. 24)	Suiza	0.50-1.50	220-1460
Ripley y Leonoff (Ref. 27)	Canadá	1.00-2.25	100-2100
Smith (Ref. 36)	Inglaterra	0.35-1.80	No hay dato
Tresidder y Fraser (Ref. 39)	Escocia	0.35-9.35	400-1600
Ward (Ref. 41)	Inglaterra, Gales	0.65	800-1000

(1) Valor de la corteza superficial.

Así mismo en la Fig. 14 [26] se presentan los resultados medios obtenidos por diversos autores que correlacionan la resistencia al esfuerzo cortante con la profundidad. Se puede observar el acusado aumento de resistencia por desecación que presentan algunos suelos turbosos, efecto importante a tener en cuenta debido a las frecuentes oscilaciones del nivel --

freático que ocurren en la mayor parte de los depósitos turbosos.

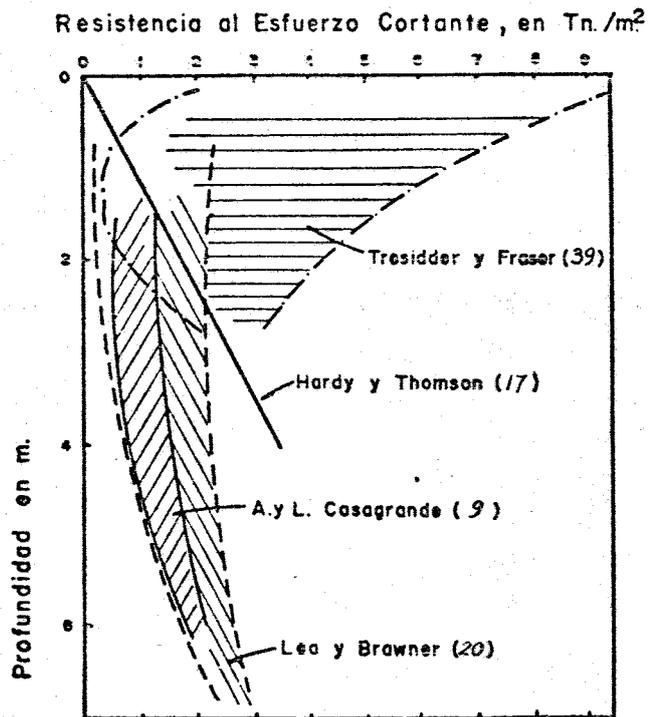


Fig.14. Resistencia al esfuerzo cortante vs. profundidad, en turbas (Mediciones con veleta en el lugar) (Tomada de la Ref.26)

#### 4.9.- Compresibilidad de las turbas

##### 4.9.1.- Consideraciones generales

Los suelos orgánicos y en particular la turba se caracterizan por la alta compresibilidad que muestran, incluso - bajo la acción de débiles cargas.

Para dar una idea de la magnitud de estas deformaciones, - en la tabla II se muestran algunos valores de asientos observados bajo terraplenes de carreteras en Francia, sobre depósitos turbosos.

En bastantes casos se ha visto que la amplitud del asiento es superior al 50% del espesor de la capa turbosa.

TABLA II

SITUACION		NATURALEZA Y ESPESOR (m) DEL TERRENO	ALTURA DEL TERRAPLEN (m)	ASIENTO (m)
Normandía, Francia [40]	Rouen	Turba 3,50	5	0,8 a 1,2
	La Maillerage	Turba 4,50 Cieno 6,50	7	3,5 a 4
	Vallée de la Dives	Turba 5 Cieno 6	7	3,5
	Caen Vallée de l'Orne	Turba 6 Cieno 3	3,5	1,9
	Tourville-la-Riviere cerca de Rouen	Turba 4 Cieno 4	9	1
	Vallée des Aulnes	Turba 5	5	3,5
	Vallée de la Risle	Turba 5	8	1,4
Villeneuve, Francia [25]	Turba 4,3 Limo 2,0 Arena	7	2,5 (1)	
Annet-sur-Marne Francia [4]	Limo 1 Turba 4 Arcilla	4 m	1,5 (2)	

(1) Con sobrecarga temporal de 1 m durante 4 meses; construcción por etapas.

(2) Con sobrecarga temporal de 1 m durante 3 meses; construcción por etapas.

La amplitud de estas deformaciones bajo estos terraplenes de carretera, obliga a prever con la mayor aproximación posible el volumen de material consumido por el asiento. Si de antemano se decide construir el relleno con el suplemento necesario, este es susceptible de poner en peligro la estabilidad del terraplen.

El fenómeno de la consolidación de la turba es extremadamente complejo. Existe una alta compresibilidad; existe, como ya se comentó anteriormente, una importante reducción de la permeabilidad; y además el proceso se complica por la existencia de la consolidación secundaria que, por ejemplo, para algunas turbas parece regirse por una relación lineal con el logaritmo del tiempo. [5]

#### 4.9.2.- Análisis del fenómeno de la consolidación

La teoría de Terzaghi sobre la consolidación unidimensional de suelos tropieza con serias limitaciones de aplicación a los suelos orgánicos y en particular a las turbas.

Las hipótesis necesarias para aplicar la teoría de Terzaghi son:

1. Suelo homogéneo
2. Suelo completamente saturado
3. Se considera despreciable la compresibilidad de las partículas de suelo y del agua.
4. Compresión unidimensional
5. Flujo de agua unidimensional
6. Validez de la ley de Darcy para el flujo del agua
7. Se considera constante el coeficiente de compresibilidad

8. Se considera constante el coeficiente de permeabilidad
9. Se considera constante el espesor del lecho consolidante
10. En cualquier instante de la consolidación, la carga total aplicada es igual a la suma de la presión efectiva mas la sobrepresión intersticial del agua.
11. El retraso en la consolidación es enteramente debido a la baja permeabilidad del suelo.

Frente a estos supuestos las turbas presentan, como ya se ha visto en los otros apartados, las siguientes propiedades:

- Heterogeneidad
- Las partículas orgánicas son compresibles y deformables
- El coeficiente de permeabilidad no es constante y disminuye notablemente en un proceso de consolidación.
- El espesor del lecho consolidante no puede considerarse constante debido a la alta compresibilidad que experimenta.

Estas variables hacen que el extrapolar los resultados de un ensayo de laboratorio para predecir el comportamiento real del terreno por los métodos clásicos es extremadamente difícil.

Numerosos autores, en años recientes, han llevado a cabo gran número de trabajos experimentales con turbas : Adams [1], [2] Schroeder y Wilson [35] Wilson et al [42] ; -- MacFarlane y Radforth [2/]. Sin embargo ninguno de ellos ha desarrollado un tratamiento teorico general que incorpore todos los factores que caracterizan el comportamiento de los suelos turbosos en la consolidación.

Posteriormente Berry y Poskitt [5] y últimamente Berry y Vickers [6] han desarrollado una teoría bastante general sobre la consolidación de turba que ha sido comprobada experimentalmente con unos resultados ampliamente satisfactorios.

Esto hace pensar que el camino emprendido por estos autores puede ser el adecuado y por éllo se transcriben a continuación los aspectos fundamentales de la:

#### TEORIA DE BERRY Y POSKITT [5]

##### TIPOS DE TURBA

En primer lugar, siguiendo los criterios de MacFarlane y Radforth [2/], que estudian el comportamiento de las turbas bajo compresión, se pueden considerar como se comentaba en el apartado 4.2., dos tipos extremos de turba entre las que caben todas las gradaciones. Para una mayor claridad, se repiten de nuevo las descripciones:

- Turba granular amorfa, en la que las partículas de suelo son principalmente de tamaño coloidal y la mayor parte del agua intersticial está adsorbida alrededor de la estructura de la partícula.
- Turba fibrosa, que tiene una macroestructura esencialmente abierta con los intersticios rellenos de una estructura secundaria de un material fino no fibroso. En ellos la mayor parte del agua intersticial aparece mas bien como agua libre que como agua adsorbida.

##### COMPORTAMIENTO REOLOGICO

La turba granular amorfa, exhibe una resistencia plastica estructural a la compresión [35], a causa del agua adsorbida alrededor de las partículas del suelo. De este modo,

muestra un comportamiento reológico similar al de los suelos arcillosos. Por tanto sería razonable esperar que el concepto de la compresión secundaria de las arcillas de Terzaghi [38] y Taylor [37] fuese aplicable a las turbas granulares amorfas.

Es decir, la naturaleza de la compresión secundaria se considera debida a un reajuste gradual de las partículas del suelo hacia una más estable configuración. Este reajuste sigue a la ruptura de la estructura del suelo que ocurre durante la primera fase.

La velocidad a la que ocurre este proceso de deformación está controlada por el agua altamente viscosa adsorbida al rededor de cada partícula.

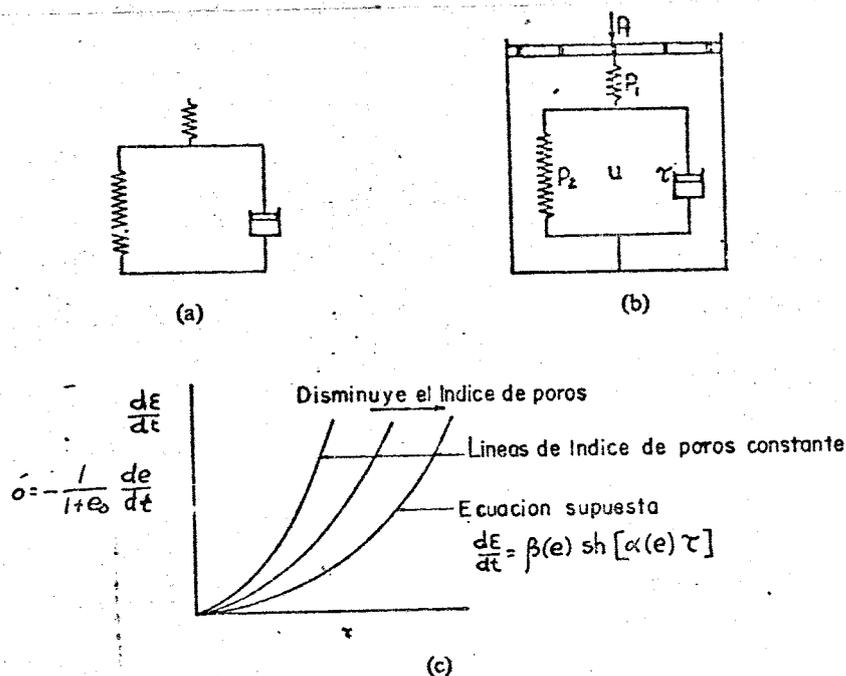


Fig.15. Modelo reológico para turba granular amorfa (Berry y Poskitt [5] )

El modelo reológico que se propone para representar la relación presión efectiva-deformación-tiempo, se indica en la Fig. 15 (a). El modelo completo para un elemento --

infinitesimal de suelo se obtiene colocando este modelo dentro del recipiente de Terzaghi. Fig. 15 (b). En la Fig. 15 (a) los muelles no son lineales y simulan la compresibilidad del suelo. De acuerdo con muchos datos experimentales publicados, se supone una relación lineal  $e$ -log  $p$ .

Se reconoce generalmente que el comportamiento viscoso del esqueleto sólido es no-newtoniano. La relación entre la tensión  $\tau$  y la velocidad de deformación  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  para el modelo, es tal como se indica en la Fig. 15 (c).

Esta relación es función del índice de poros a través de dos parámetros reológicos  $\alpha$  y  $\beta$ .

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \beta(e) \operatorname{sh}[\alpha(e)\tau] = -\frac{1}{1+e_0} \frac{de}{dt}$$

En la turba fibrosa, reconoce dos grados de estructura; una red de macroporos y otra de microporos. Según Adams [1], la consolidación primaria es debida al drenaje del agua de la red de macroporos y la secundaria al lento drenaje del agua de los microporos hacia los macroporos. De Jong [//][/2] ha sugerido también un mecanismo similar basado en un sistema de poros interconectados.

En la Fig. 16 (a) se ha dibujado el modelo reológico que se propone para explicar la consolidación primaria y secundaria. En el modelo, el muelle superior representa la compresibilidad de la propia materia orgánica. Ambos muelles se consideran no lineales y se supone también una variación lineal  $e$ -log  $p$ .

El modelo de la Fig. 16 (a) equivale a dos recipientes de Terzaghi. La sobrepresión de agua en el compartimento superior representa la presión macrointersticial (que es la presión que se registra en cualquier ensayo), y la sobre-

presión en el compartimento inferior representa la media -  
equivalente de la presión microintersticial. De la misma -  
manera, los orificios del pistón del compartimento inferior  
representan la permeabilidad de los microporos.

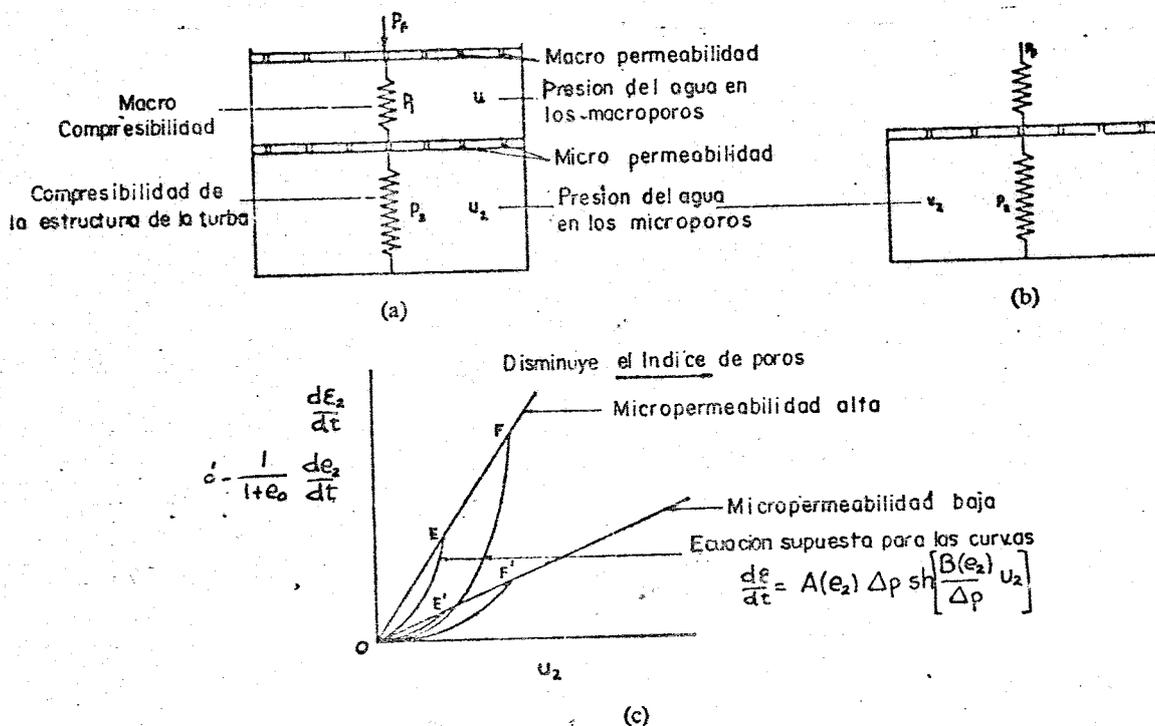


Fig.16. Modelo reológico para turbas fibrosas (Berry y Poskitt [5])

El compartimiento inferior introduce una intrínseca depen-  
dencia del tiempo en la ecuación presión efectiva-deforma-  
ción, ya que parte del asiento total es retardado por re-  
trasos debidos a la lentísima disipación de la presión in-  
tersticial de los microporos hacia los macroporos.

Suponiendo que la micropermeabilidad decrece también en -  
el proceso de consolidación, las curvas que se dibujan en  
la Fig. 16 (c) expresarían la variación de  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  con la pre-  
sión microintersticial. Estas curvas pueden ser expresadas  
por una ecuación del tipo de

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = A(\varepsilon_2) \Delta p \operatorname{sh} \left[ \frac{B(\varepsilon_2)}{\Delta p} u_2 \right] = -\frac{1}{1+e_0} \frac{de_2}{dt}$$

donde A y B son parámetros reológicos que dependen del valor común del índice de poros.

### Ecuación de la consolidación. Soluciones

Partiendo de la ecuación de la continuidad, e introduciendo los supuestos: variación de la permeabilidad con el índice de poros según una relación lineal  $e$ -log  $k$ ; variación de la compresibilidad según la relación lineal  $e$ -log  $p$ ; y los derivados del comportamiento reológico de cada tipo de turba según los modelos explicados, se puede llegar a una ecuación extremadamente compleja que introduciendo algunas particularizaciones puede resolverse numéricamente.

Estas simplificaciones consisten en suponer una ley determinada de variación de los parámetros reológicos con el índice de poros, que se supone es lineal:  $e_2$ -log PARÁMETRO, por analogía con otras relaciones.

Los parámetros reológicos, los coeficientes de permeabilidad, los índices de macro y/o microporos y las presiones efectivas se expresan en función del tiempo y de los valores finales e iniciales de esos factores.

De esta manera, la resolución de la Ecuación de la consolidación se puede realizar para determinados valores comunes de los parámetros que intervienen.

Para la determinación de los parámetros reológicos iniciales y finales del suelo es necesario ajustar la parte final de la curva de compresión secundaria obtenida en un ensayo edométrico con las curvas-solución de la ecuación de la consolidación.

Los valores iniciales y finales de la permeabilidad vertical se determinan a partir de ensayos de flujo con carga de agua constante, en cada escalón de carga.

## Comprobación de la teoría

En las Fig. 17 y 18, se presentan los resultados de la experimentación real llevada a cabo para juzgar la validez de la teoría.

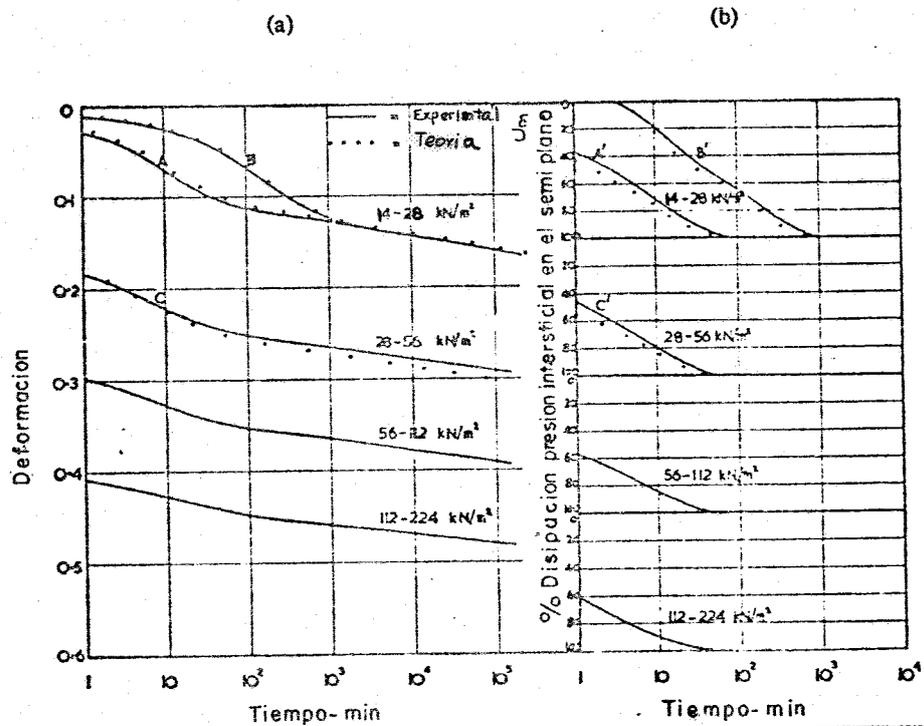


Fig. 17. Curvas experimentales deformación-tiempo y presión intersticial en el semiplano-tiempo, para turba granular amorfa (Berry y Poskitt[5])

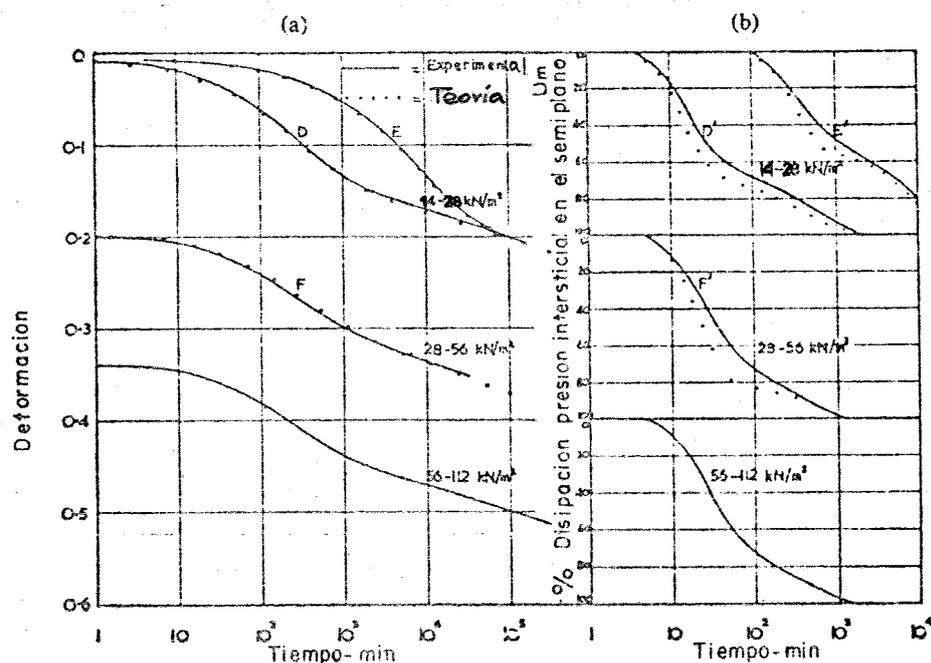


Fig. 18. Curvas experimentales deformación-tiempo y presión intersticial en el semiplano-tiempo, para turba fibrosa. (Berry y Poskitt [5])

Como se puede apreciar la concordancia entre las curvas -  
teóricas y las experimentales es más que aceptable de don-  
de se deduce la validez de la teoría.

### Conclusiones

La teoría de Berry y Poggitt parece ser válida para deter-  
minar la compresibilidad de una turba.

Si se aplica esta teoría para predecir el comportamiento -  
real, es necesario asegurarse que las muestras de suelo -  
sean verdaderamente representativas de la masa. En los en-  
sayos de los autores es evidente que el diámetro de las -  
muestras (250 m.m.) no cumple perfectamente esta condición  
(sobre todo para el caso de turbas fibrosas [6] ).

Se ha visto que la parte de la consolidación primaria de -  
las curvas asientos-tiempo puede ser aproximadamente pro-  
porcional con  $H^2$  (H= espesor del lecho consolidante).

La disminución de la permeabilidad vertical  $k_v$  durante el  
proceso de consolidación de una turba fibrosa es del orden  
de  $10^3$ . La correspondiente disminución de la compresibili-  
dad es mucho menor, por lo que el efecto neto es una nota-  
ble reducción de la velocidad de drenaje [6] . Esto se re-  
fleja en una pronunciada disminución del coeficiente de -  
consolidación  $C_v$  durante cada incremento de carga. Por --  
ello, los valores deducidos de  $k_v$  a partir de  $C_v$  son poco -  
significativos.

#### 4.9.3.- Sobreconsolidación. Su relación con la consolidación secun- daria

Frecuentemente se atribuye la sobreconsolidación existente  
en algunas turbas a variaciones del nivel freático. Aunque  
no se descarta totalmente esta causa parece más probable -

la intervención de la compresión secundaria en este fenómeno, como propone L. Bjerrum [7].

La importancia del fenómeno de la sobreconsolidación y de la compresión secundaria en turbas, hace que se pase revista a los aspectos más interesantes de la teoría de Bjerrum.

Durante el proceso de sedimentación el aumento de presiones efectivas conduce a consolidar las capas profundas.

Si se toma una muestra de suelo, supuesto normalmente consolidado, a una profundidad  $h$ , tal que la presión efectiva a esa profundidad es  $\sigma'_0$ , se calcula su índice de poros y se realiza con ella un ensayo edométrico convencional, - es decir de corta duración, la curva resultante será del tipo de la dibujada de trazos en la Fig. 19.

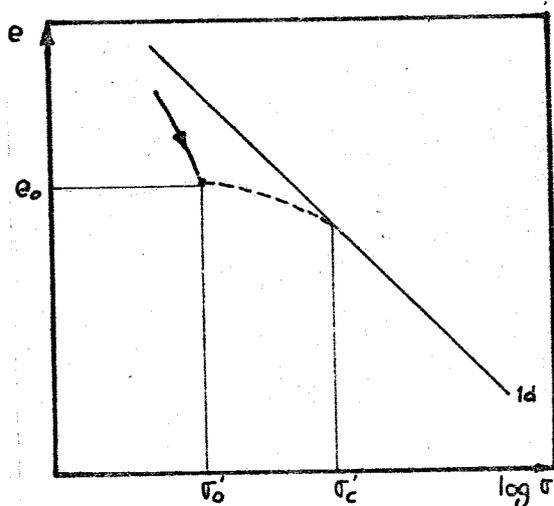


Fig. 19.

Ocurrirá que el punto representativo del estado inicial -  $(e_0, \sigma'_0)$  está a la izquierda o por debajo de la rama recta de la curva edométrica, lo que indicaría al parecer, que el suelo está sobreconsolidado, con una razón de sobreconsolidación  $\sigma'_c / \sigma'_0$ , aunque el suelo nunca haya estado sobrecargado. Lo que realmente ocurre es que, por efecto de la compresión secundaria, durante todo el proceso de sedimentación, el suelo ha ido consolidándose desde un estado --

anterior hasta el actual. Esto viene representado por la curva de trazo continuo de la Fig. 19.

Si en el hipotético escalón de carga  $\sigma'_0 \rightarrow \sigma'_c$ , se dejase actuar la carga  $\sigma'_c$  por un período largo de tiempo, Fig. 20, ocurriría que el índice de poros seguiría disminuyendo hasta un valor  $e_1$  al final de este escalón de larga duración (por ejemplo 100 días). Incluso para cargas menores de  $\sigma'_c$  ocurriría lo mismo si se mantuviesen estos largos periodos de tiempo Fig. 21.

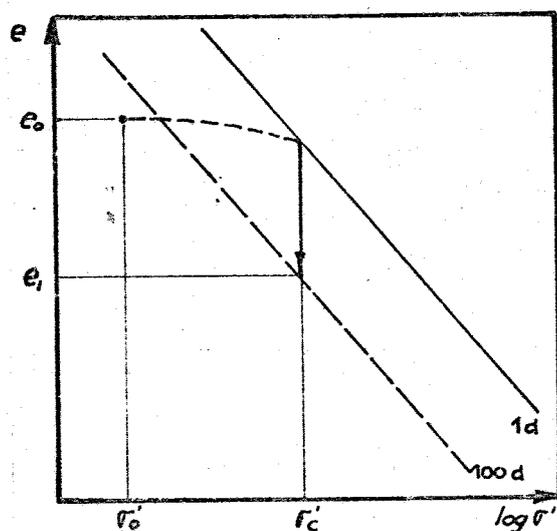


Fig. 20

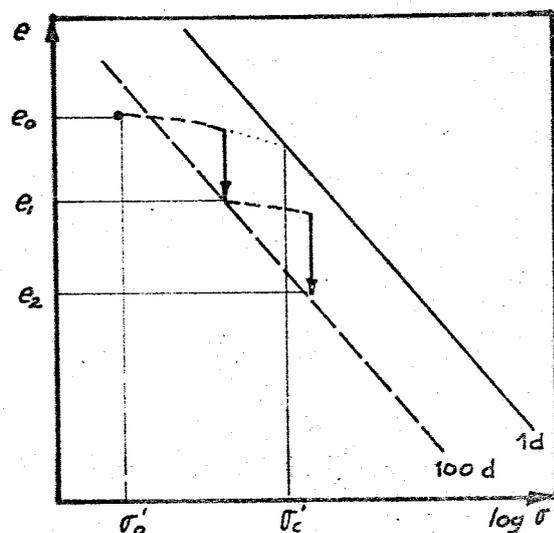


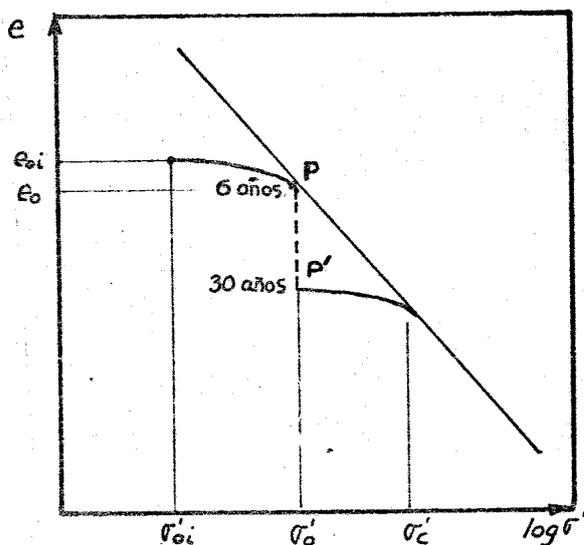
Fig. 21

Es decir, el concepto de la sobreconsolidación está íntimamente ligado a la duración del ensayo. La presión de sobreconsolidación  $\sigma'_c$  aparece porque la duración del ensayo edométrico es demasiado corta comparada con el tiempo de estabilización de los suelos in situ.

Por tanto, si en cada escalón de carga de un ensayo edométrico, se deja actuar la carga por un tiempo muy largo, al final de cada ensayo el suelo estaría normalmente consolidado.

J. Vautrain [40] cita un ejemplo muy interesante respecto a este fenómeno, constatado en el Valle del Sena, cerca de Rouen. En un terraplen de 2 m de altura construido sobre

3 m de turba y 5 m de cieno, al cabo de 6 años, parecía haber terminado la consolidación del terreno, pues no se registraba ninguna sobrepresión intersticial. Una muestra de suelo tomada en ese instante, indicó que el suelo parecía estar normalmente consolidado bajo la carga de 2 m. En la Fig. 22 el estado actual vendría representado por el punto P.



$\sigma'_o$ : fusión debida al peso del terreno de encima + 2m de terraplen

Fig. 22

Sin embargo, en el mismo sitio, bajo otro terraplen de la misma altura pero construido hacía 30 años, el terreno presentaba una sobreconsolidación importante  $\sigma'_c / \sigma'_o = 2$ . (El punto representativo del estado actual de la segunda muestra sería el P').

El periodo de tiempo 30 años corresponde a un proceso de carga mantenido durante largo tiempo en comparación con el período de 6 años.

Independientemente del fenómeno de sobreconsolidación relacionado con la compresión secundaria, pueden existir otras causas que provoquen una sobreconsolidación ficticia. Tal es el caso de que se produzca una alteración de las propiedades físicas y mecánicas de la turba análogas a las que produce una sobrecarga, pero por otros factores. Entre ellos se puede citar el caso del ataque y descomposición

de la materia orgánica por la invasión del agua salada en una turbera litoral, por cambios climáticos importantes - etc. [40] .

En algún caso podría llegar a desprejarse la amplitud del asiento debido a la consolidación secundaria frente al - asiento debido a la consolidación primaria. Fig. 23.

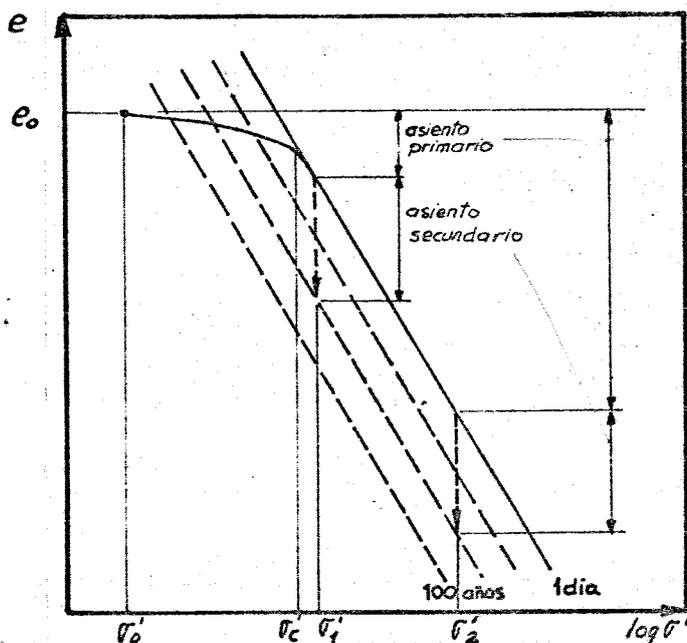


Fig. 23

Si la carga inducida sobre el terreno es muy grande ( $\sigma'_2$ ) - en comparación con la "ficticia" presión de sobreconsolidación, el asiento secundario con respecto al total puede ser pequeño, tanto más cuanto el instante al cabo del cual interese conocer el asiento esté más próximo a la duración - del ensayo edométrico.

Para cargas como  $\sigma'_1$ , próximas a  $\sigma'_c$ , la presión de sobreconsolidación, el asiento secundario tiene mucha mayor importancia y no debe ser depreciado. Para cargas inferiores a la presión de sobre consolidación el asiento a producir sería sólo secundario.

## 5.- Agradecimientos

El autor agradece a la dirección de Autopistas del Mare Nostrum S.A. el permiso para la publicación de los datos referentes a los suelos orgánicos del Levante español.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1 . J.I. ADAMS, "A comparison of field and Laboratory measurement in peat" Proceedings of 9<sup>th</sup> Muskeg. Res. Conf. and - Ontario Hydro Res. 1963, O.15, 1-7.
- 2 . J.I. ADAMS. "The Engineering Behaviour of a Canadian Muskeg" Proc 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and - Foundation Engineering, Vol 1. 1965.
- 3 . K.O. ANDERSON y R.A. HEMPSTOCK."Relating the Engineering - Properties of Muskeg to some Problems of Fill Construction." Memoria Técnica N<sup>o</sup> 61, National Research Council. Canadá, 1959.
- 4 . J.L. BANGRATZ. "Etude et réalisation d'un remblai sur sol tourbeux" Bulletin Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées n<sup>o</sup> 62 Paris Nov-Déc 1972 pp. 38-42.
- 5 . P.L.BERRY and T.J. POSKITT. "The consolidation of peat" - Geotechnique London, Vol 22 1972 p.p. 27-52.
- 6 . P.L. BERRY and B. VICKERS. "Consolidation of Fibrous Peat" Journal of the Geotechnical Engineering Division. August - 1975 p.p. 741-753.
- 7 . L. BJERRUM. Engineering geology of Norwegian Normally - Consolidated Marine Clays as related to settlements of buildings" 7<sup>th</sup> Rankine Lecture, Geotechnique 17, London 1967 p.p. 81 a 118.
- 8 . L. CASAGRANDE. "Construction of Embankments Across Peaty Soils". Journal of the Boston Society of Civil Engineers. Vol. 53, N<sup>o</sup> 3, 1966.
- 9 . A. CASAGRANDE y L. CASAGRANDE. Investigation for Neponset Swamp Crossing and River Bridge. Informe no publicado, citado en la Ref. 8 1953.

- 10 . E.C. DAPPLES. "Geología Básica en Ciencias e Ingeniería"  
Ed. Omega. Barcelona 1.963.
- 11 . G.D.J. DE JONG. "On the secondary consolidation of soils"  
Lecture al King's College, University of London, 1966.
- 12 . G.D.J. DE JONG. "Consolidation models consisting of an  
assembly of viscous elements on a cavity channel network".  
Geotechnique 17, 1968, no 3, p.p. 261-273.
- 13 . A. DUCKER. "Properties of Peat Deposits in Schleswing, --  
Holstein, Germany. Geologisches Landesamt". Kiel. Informe  
no publicado citado en la Ref. 8 1964.
- 14 . C.K. FRASER. "Observations during Bog Blasting in Co. --  
Armagh, Northern Ireland". Dept. Scint. and Ind. Research  
Road Research Laboratory, noté N° RN/2881/CKF. Inglaterra,  
1956
- 15 . F. GRISELLINI. Mapas geográficos existentes en la Sala del  
Escudo del Palacio Ducal en Venecia, Siglo XVIII.
- 16 . E.T. HANRAHAN. "An investigation of some physical properties  
of Peat". Geotechnique London Vol. 4, 1954.
- 17 . R.M. HARDY y S. THOMSON. "Measurement of the Shearing --  
Strength of Muskeg". Proc. Eastern Muskeg Research Meeting.  
Memoria Técnica N° 42. National Research Council, Canadá,  
1956.
- 18 . A. HOLMES. "Geología Física". Ed. Omega. Barcelona 1971.
- 19 . D.P. KRYNINE, W.R. JUDD. "Principios de Geología y Geotec  
nia" Ed. Omega. Barcelona 1961.
- 20 . N.D. LEA, C.O. BRAWNER. "Higway Design and Construction -  
over Peat Deposits in Lower British Columbia". Highway -  
Research Board Record n° 7. 1103. Washington 1963.

- 21 . I.C. MAC FARLANE, N.W. RADFORTH. "A study of the physical behaviour of peat derivatives under compression" Proceedings 10<sup>th</sup> Muskeg Res, Conf. p. 159. Ottawa: National Research Council of Canada.
- 22 . G. MARGASON y C.K. FRASER. "Bog Blasting in Northern Ireland". Dept. of Scient. and Ind. Res. Road Research Laboratory note N<sup>o</sup> LN/328/G.M. CKF. Inglaterra, 1963.
- 23 . B. MELENDEZ, J.M. FUSTER. "Ceología" 3<sup>a</sup> Edición. Ed. Paraninfo Madrid 1973.
- 24 . A. VON MOOS y A. SCHNELLER. "Slide of Highway Embankment - on Peat near Sargans", St. Gallen. Strasse and Verkehr. N<sup>o</sup> 10. Alemania 1961.
- 25 . E. RECORDON. "Remblais sur sols tourbeux ou craie lacustre" Bulletin technique de la Suisse Romande 98<sup>e</sup> année, 4 Mars 1972 n<sup>o</sup> 5 p.p. 71-79.
- 26 . A. RICO y H. DEL CASTILLO. "La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres" Volumen 1. Ed. Linusa S.A. Mexico 1974.
- 27 . C.F. RIPLEY y C.E. LEONOFF. "Embankment Settlement Behavior on Deep Peat". Proc. VII Muskeg Res. Conf. Memoria técnica N<sup>o</sup> 71. National Research Council. Canadá, 1961.
- 28 . JOHN J.W. ROGERS, JOHN A.S. ADAMS, "Fundamentos de Geología" E. Omega Barcelona 1969.
- 29 . F.M. ROMAN-(INTECSA), "Informe sobre el reconocimiento de zonas "blandas" en las proximidades de Gandía y Jaraco" realizado para AUMAR, S.A. Valencia. Marzo 1973, no publicado.

- 30 . F.M. ROMAN-(INTECSA). "Informe sobre el reconocimiento de terreno en las cercanías de Favareta y Tabernes de Vall digna" realizado para AUMAR, S.A. Valencia Agosto 1973. No publicado.
- 31 . F.M. ROMAN-(INTECSA). "Informe sobre el reconocimiento de terreno al Oeste de Cullera" realizado para AUMAR, S.A. Valencia Julio 1973. No publicado.
- 32 . F.M. ROMAN-(INTECSA). "Informe sobre el reconocimiento de terreno entre Sollana y el Río Júcar" realizado para - AUMAR, S.A. Valencia Agosto 1973. No publicado.
- 33 . F.M. ROMAN, A. SUSTAETA, (INTECSA). "Proyecto de un terraplén sobre turbas, de acceso a una estructura sobre el Río Ebro" realizado para AUMAR, S.A. Valencia, Junio - 1975. No publicado.
- 34 . F.M. ROMAN, (INTECSA). "Estudio de la estabilidad de un - terraplén sobre turbas cerca de Oliva, Valencia" realizado para AUMAR, S.A. Valencia, 1975. No publicado.
- 35 . J. SCHROEDER and N.E. WILSON. "The analysis of secondary consolidation of peat" Proc. 8<sup>th</sup> Muskeg Res. Conf. p. 130 Ottawa : National Research Council of Canadá 1962.
- 36 . A.H.V. SMITH. "A Survey of Some British Peats and Their Strength Characteristics". Army Operational Research Group Reporte Nº 32/49. Inglaterra, 1950.
- 37 . D.W. TAYLOR. "Research on consolidation of clays", Serial 82. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Sanitary Engineering. 1942.
- 38 . K. TERZAGHI. "Undisturbed clay samples and undisturbed - clays" Journal Boston Soc. Civ. Engineers 28, 1941, nº 3 p.p. 211-231.

- 39 . J.O. TRESIDDER y C.K. FRASER. "The Construction of an --  
Experimental Road over Peat at Hamar, Shetland." Dept. --  
Scient, and Ind. Res. Road Research Laboratory, note N<sup>o</sup>  
R.N./2394/J.O.T. CKF. Inglaterra, 1955.
- 40 . J. VAUTRAIN. "Reflexions sur la compresibilité des --  
tourbes en Normandie". Bull. Liaison Laboratoires des --  
Ponts et Chaussées, n<sup>o</sup> 84. Juil-Aout 1976 - Réf. 1777 -  
p.p. 101-111.
- 41 . W.H. WARD. "A Slip in a Flood Defense Bank Constructed on  
a Peat Bog". II Congreso Internacional de Mecánica de Sue-  
los e Ingeniería de Cimentaciones. Vol. II. Rotterdam,  
1948.
- 42 . N.E. WILSON, N.W. RADFORTH, J.C. MACFARLANE and M.B.LO.  
"The rates of consolidation for peat" Proc 6<sup>th</sup> Int. Conf.  
Soil. Mech. Montreal 1965. Vol. 1 p. 407.