17

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DEL DOCTORADO

MECANISMO DE LAS GRIETAS DE TENSION EN EL VALLE DE MEXICO

por

EULALIO JUAREZ BADILLO

Tesis para optar al grado de
Doctor en Ingeniería

CIUDAD UNIVERSITARIA
MEXICO, D.F.
Marzo de 1961.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

0257

16/1

MECANISMO DE LAS GRIETAS DE TENSION EN EL VALLE DE MEXICO

C O N T E N I D O

Página

CONTENIDO i

LISTA DE FIGURAS iii

SINOPSIS v

CAPITULO I. Introducción. 1

CAPITULO II. Discusión del problema haciendo uso de analogías. 3

1. Evaporación superficial en una arcilla saturada. 3
2. Efecto de la anulación de las tensiones neutrales. 4
3. Esfuerzos originados por fuerzas exteriores en una arcilla saturada. 5

CAPITULO III. Solución analítica del problema. 8

1. Esfuerzos generados en una arcilla saturada por evaporación superficial. 8
2. Esfuerzos inducidos en una arcilla saturada al anular la tensión neutral producida por evaporación superficial. 11
3. Esfuerzos generados por fuerzas exteriores en una masa de arcilla saturada no confinada. 13

CAPITULO IV. Aplicación de la teoría al caso de las grietas en el lecho del antiguo lago de Texcoco. 19

CAPITULO V. Puntos principales que requieren investigación. 27

CAPITULO VI. Resumen y conclusiones. 33

APENDICE A. Solución del problema con valores en la frontera correspondiente a la consolidación unidimensional en una masa semi-infinita de arcilla saturada por efecto de evaporación superficial. 35

APENDICE B. Solución del problema correspondiente a la obtención de los esfuerzos generados por fuerzas exteriores en una masa de arcilla saturada no confinada haciendo uso del cálculo tensorial. 37

APENDICE C. Notación y definiciones. 39

AGRADECIMIENTO 41

REFERENCIAS 42

LISTA DE FIGURAS

FIG.	TITULO	PAGINA
1.	Analogía de un elemento de arcilla saturada expuesto a evaporación superficial.	6
2.	Analogía de una masa de arcilla saturada expuesta a evaporación superficial.	6
3.	Forma de la distribución de las tensiones neutrales producidas por la evaporación superficial en una masa de arcilla saturada.	7
4.	Analogía de un elemento de arcilla saturada en donde se anula la tensión neutral producida por evaporación superficial.	7
5.	Tabla de la función $f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\, x} e^{-x^2}$ - erfc x.	16
6.	Gráfica de la función $f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\, x} e^{-x^2}$ - erfc x.	17
7.	Volumen cúbico elemental a la profundidad z en una masa de arcilla saturada.	18
8.	Volumen cúbico elemental no confinado de arcilla saturada sometido a la presión exterior p.	18
9.	Gráfica de las tensiones neutrales inducidas por evaporación superficial en función de la profundidad a distintos tiempos en la arcilla saturada del lecho del antiguo lago de Texcoco.	22
10.	Gráfica de las tensiones horizontales efectivas inducidas en función de la profundidad a distintos tiempos en la arcilla saturada del lecho del antiguo lago de Texcoco.	23

11. Fotografía aérea de una retícula de grietas localizada cerca del evaporador helicoidal "El Caracol". 24

12. Fotografía de una grieta localizada entre las pistas del Aeropuerto Central. 24

13. Fotografía de una grieta localizada entre las pistas del Aeropuerto Central. El agua de lluvia inundó el pozo a cielo abierto excavado posteriormente a la formación de olla. 25

14. Fotografía de cerca de una grieta entre las pistas del Aero puerto Central que muestra derrumbos en las paredes de olla. 25

15. Fotografía de una grieta localizada en la zona poblada de la Col. Oriental. 26

16. Fotografía de una casa habitación afectada por una grieta localizada en la Col. Panamericana. 26

S I N O P S I S

En este trabajo se expone una teoría sobre la formación de grietas al depositarse una lámina de agua sobre la superficie de una arcilla saturada que ha estado expuesta a una fuerte y prolongada evaporación. Primeramente se presenta el problema y la forma de solución haciendo uso de analogías para luego analizar las tensiones neutrales originadas en la masa de arcilla por la evaporación superficial y posteriormente las tensiones horizontales efectivas inducidas al depositarse una lámina de agua superficial.

Se incluyen una aplicación de la teoría al caso de las grietas que se forman en el lecho del antiguo lago de Texcoco del valle de México y una discusión sobre los puntos principales que requieren investigación.

CAPITULO I

INTRODUCCION

El agrietamiento de extensas zonas del valle de México, principalmente en el lecho del antiguo lago de Texcoco, ha sido un problema que desde hace tiempo ha dado lugar a observaciones y estudios por parte de los ingenieros e investigadores mexicanos, pues en varias ocasiones ha causado daños a construcciones, pavimentos, obras de drenaje, etc., siendo, dicho agrietamiento, un factor que en lo futuro pueda limitar la expansión de la ciudad de México hacia dichas zonas.

Las grietas tienen la peculiaridad de originarse súbitamente después de los primeros aguaceros fuertes de la temporada de lluvias al formarse una lámina de agua superficial, (Refs. 1 a 4).

La profundidad de estas grietas no ha podido determinarse debido, principalmente, a la dificultad de profundizar un pozo a cielo abierto más allá del nivel freático. Los pozos más profundos que se han abierto son del orden de 5 m., pudiéndose apreciar que las grietas son mucho más profundas; se estima, sin embargo, que no llegan al estrato permeable que está a la profundidad aproximada de 30 m. El ancho de ellas varía desde unos cuantos milímetros hasta varios decímetros, y su longitud fluctúa entre las decenas y las centenas de metros.

Entre las observaciones y estudios realizados sobre este tema, aparecen principalmente los efectuados por el Dr. Nabor Carrillo, quien, en diversas ocasiones, expuso al autor las ideas por él concebidas sobre la génesis de las grietas mencionadas y que a grandes razgos son como sigue:

Se supone un flujo horizontal a través de un estrato permeable subyaciendo una masa de arcilla saturada. Se concibe, como resultado de este estado dinámico de escurrimiento, un sistema de esfuerzos horizontales en la parte superior de la arcilla en tal forma que el agua se supone trabajando a tensión y el suelo a compresión; después de una lluvia se considera que el agua pasa a trabajar a compresión y el suelo a tensión.

En el presente trabajo, el problema se enfoca desde un punto de vista diferente, pues no se requiere la existencia de un flujo en un estrato permeable, sino que se supone que el estado de tensiones neutrales es el resultado de una intensa y prolongada evaporación superficial. Al anularse dicho estado de tensiones neutrales, v.g.: por la formación de una lámina de agua superficial, se inducen esfuerzos efectivos de tensión en sentido horizontal. Estos son los responsables, bajo ciertas condiciones anteriores de esfuerzo, de la formación de grietas en la parte superior de la masa de arcilla saturada. En el análisis del problema se supone que la arcilla es homogénea e isótropa y que permanece en todo momento totalmente saturada.

CAPITULO II

DISCUSION DEL PROBLEMA HACIENDO USO DE ANALOGIAS

1. Evaporación superficial en una arcilla saturada

Con el objeto de comprender mejor el efecto de la evaporación en una masa de suelo, establezcamos la siguiente analogía:

Consideremos una cámara cilíndrica en cuya parte superior existe un émbolo sin fricción con un poro capilar y, adentro de la cámara, un resorte vertical, según se ilustra en la Fig. 1.

Supongamos que la cámara está totalmente llena de agua y que se somete a la evaporación por su parte superior.

A medida que la evaporación progresa, se irá desarrollando un menisco en el poro capilar, el agua trabajará a tensión mientras que el resorte trabajará a compresión. El fenómeno continuará mientras el poro sea capaz de desarrollar tensión capilar.

Consideremos ahora, una serie de cámaras indeformables dispuestas en dirección vertical, una a continuación de otra, como se ilustra en la Fig. 2 (a); la distribución inicial de presiones neutrales corresponde a la hidrostática representada por la línea 1-2.

Al iniciarse la evaporación se formará un menisco en el poro capilar del émbolo A, con lo que el agua de la cámara I trabajará a un exceso negativo de presión hidrostática o tensión y el resorte de esta cámara a compresión. Debido al gradiente hidráulico originado en el poro capilar del émbolo B por la disminución de presión en la primer cámara, empezará a fluir el agua de la cámara II a la I, originando una tensión en el agua de la cámara II y una compresión en el resorte correspondiente. Este proceso se difunde similarmente a las cámaras inferiores creándose un flujo ascendente en todo el sistema, pudiendo considerarse que al cabo de un cierto tiempo la distribución de presiones neutrales son las indicadas por la línea discontinua 3-4 en la Fig. 2 (b). La distribución de esfuerzos neutrales en el interior de cada cámara será la hidrostática.

Por último, si consideramos que en un cierto espesor el número de cámaras crece indefinidamente, tendiendo la altura de cada cámara a cero, la línea discontinua en la Fig. 2 (b) se convertirá en una curva como se ilustra en la Fig. 3.

2. Efecto de la anulación de las tensiones neutrales

Consideremos, como en el caso anterior, una cámara cilíndrica con su émbolo con un poro capilar, pero ahora con tres resortes orientados según los ejes coordenados como se ilustra en la Fig. 4, y además con un aditamento especial (no mostrado en la figura) en tal forma que a toda compresión o elongación del resorte vertical corresponde una compresión o elongación de los resortes horizontales. Supongamos además que la resistencia a la tensión de los resortes es despreciable.

Supongamos que esta cámara estuvo expuesta largo tiempo a la evaporación a través del poro capilar de su émbolo y que, debido a ello, el agua está trabajando a tensión y el resorte vertical a compresión. Además, supongamos que los resortes horizontales están trabajando a una cierta compresión, originada por el confinamiento de la cámara y el efecto transmitido por la compresión del resorte vertical.

Anulemos ahora la tensión neutral en la cámara, lo cual se puede lograr destruyendo el menisco en el poro capilar del émbolo por la creación de una lámina superficial de agua.

Al destruir la tensión neutral, el resorte vertical tenderá a tomar su longitud correspondiente a presión nula, induciendo con ello tensiones en los resortes horizontales.

Si la tensión inducida es menor que la compresión a que estaban trabajando los resortes horizontales, se producirá el proceso inverso al de consolidación, es decir, habrá una expansión que progresará con el tiempo; si por el contrario, la tensión es mayor en magnitud que la compresión, los resortes horizontales fallarán.

3. Esfuerzos originados por fuerzas exteriores en una arcilla saturada.

Consideremos ahora un caso semejante al de la sección anterior, suponiendo que la cámara posee además la propiedad de que su diámetro puede cambiar de magnitud según cambie la longitud de los resortes correspondientes, es decir, no existe confinamiento lateral, tal como ocurre con su altura al deformarse el resorte vertical por desplazamiento del émbolo y, supongamos además, que el agua es incompresible.

Si aplicáramos a esta cámara una fuerza vertical exterior P sobre su émbolo, existirá una compresión inmediata del resorte vertical acompañada por una elongación de los resortes horizontales. En consecuencia, el resorte vertical trabajará a compresión y los horizontales a tensión. Como esto sucede a volumen constante, podrán valuarse dichas fuerzas conociendo las constantes de cada uno de ellos. El agua trabajará a compresión, pudiéndose deducir la magnitud de este esfuerzo al conocer la fuerza que toma el resorte vertical. En conclusión podríase decir: la fuerza P es inmediatamente tomada parcialmente por el agua y parcialmente por el resorte vertical, con la inducción de tensiones en los resortes horizontales.

Los fenómenos tratados en este capítulo se analizarán en el capítulo III.

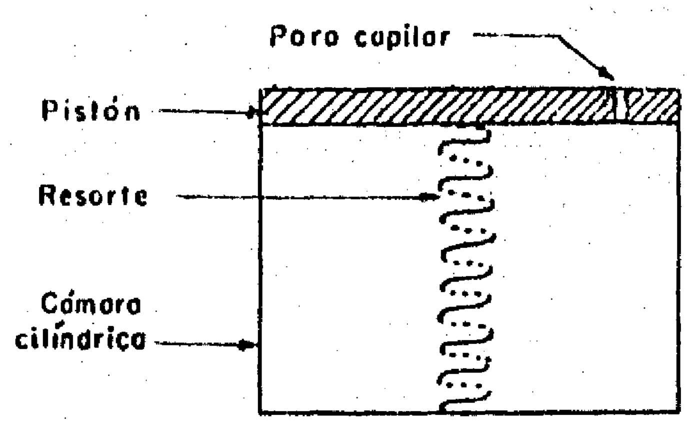

Fig. 1. Analogía de un elemento de arcilla saturada expuesto a evaporación superficial.

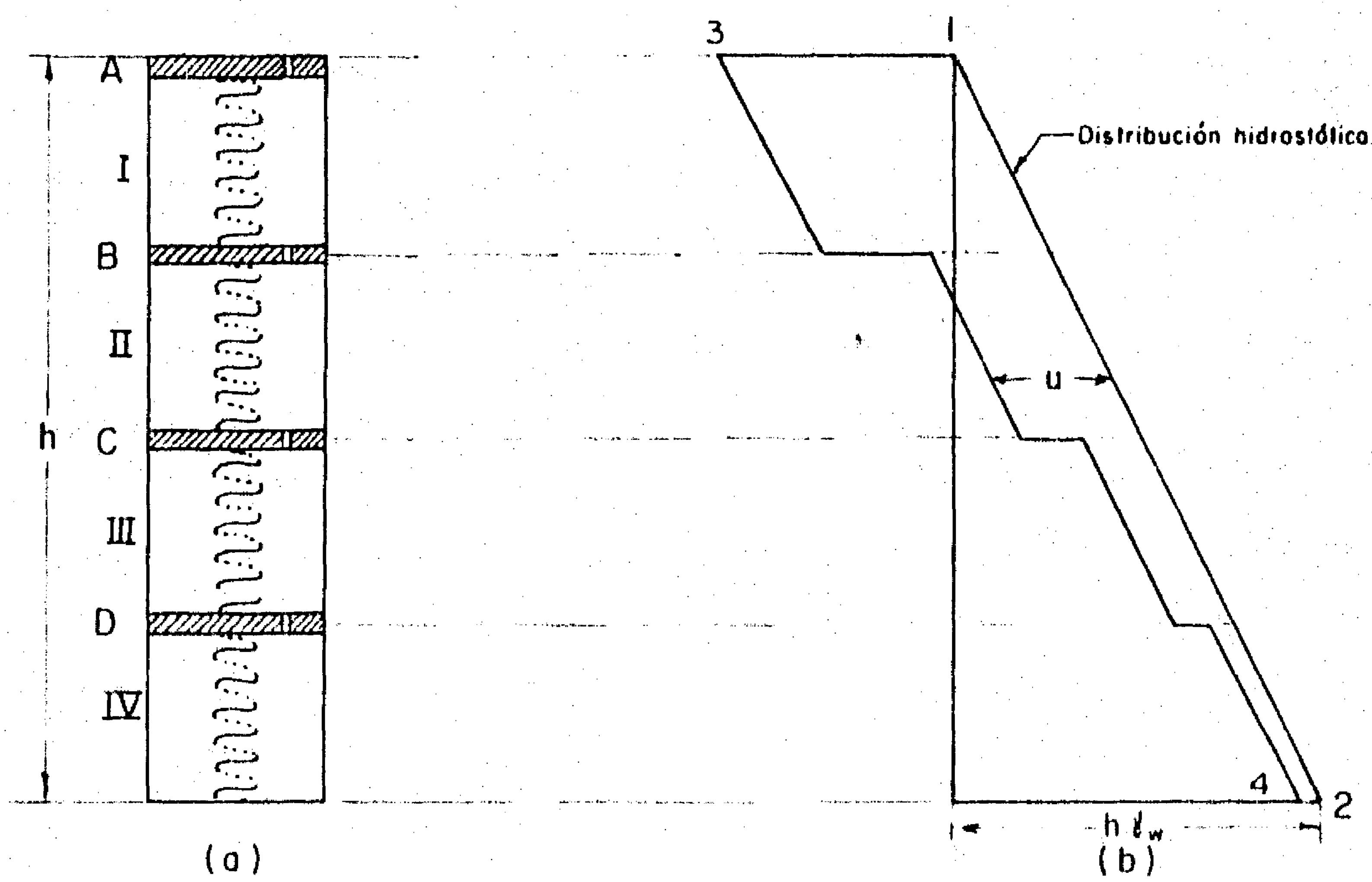

Fig. 2. Analogía de una masa de arcilla saturada expuesta a evaporación superficial.

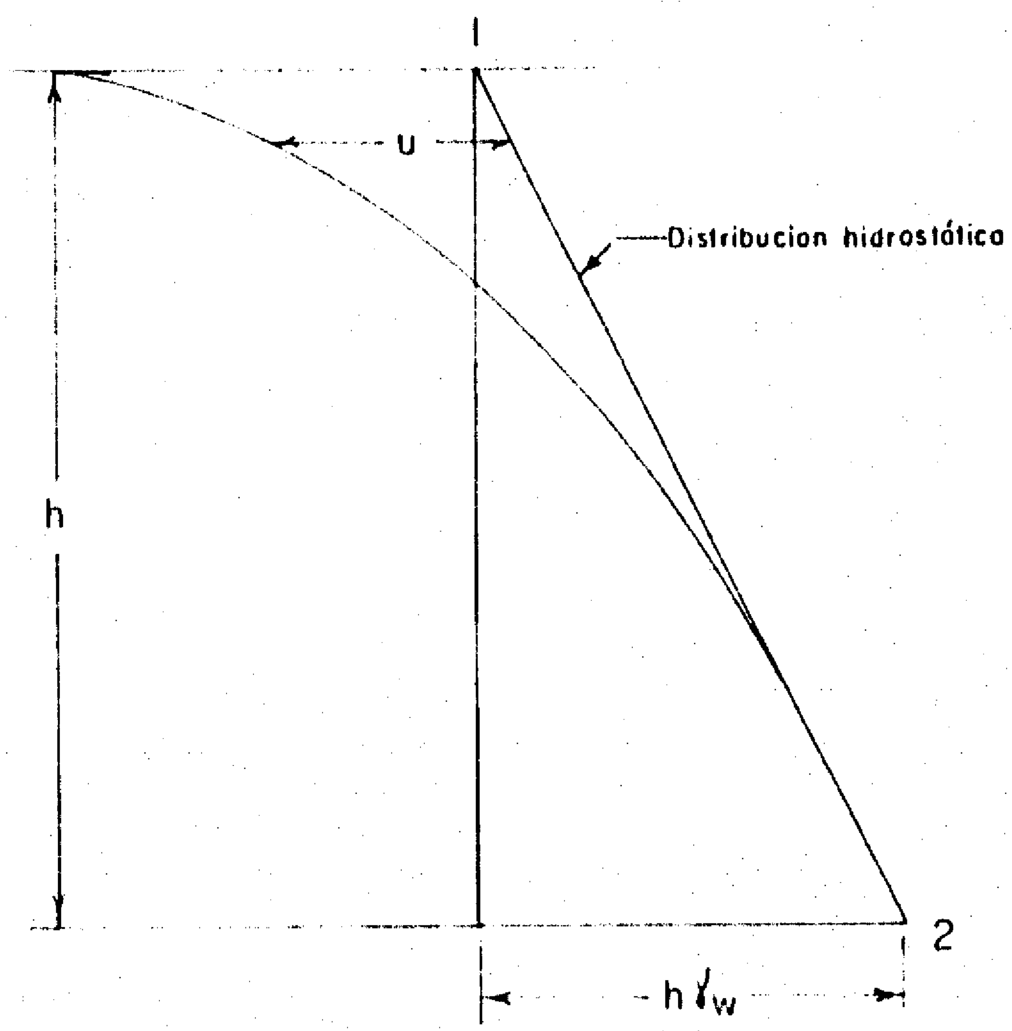

Fig. 3. Forma de la distribución de las tensiones neutrales producidas por la evaporación superficial en una masa de arcilla saturada.

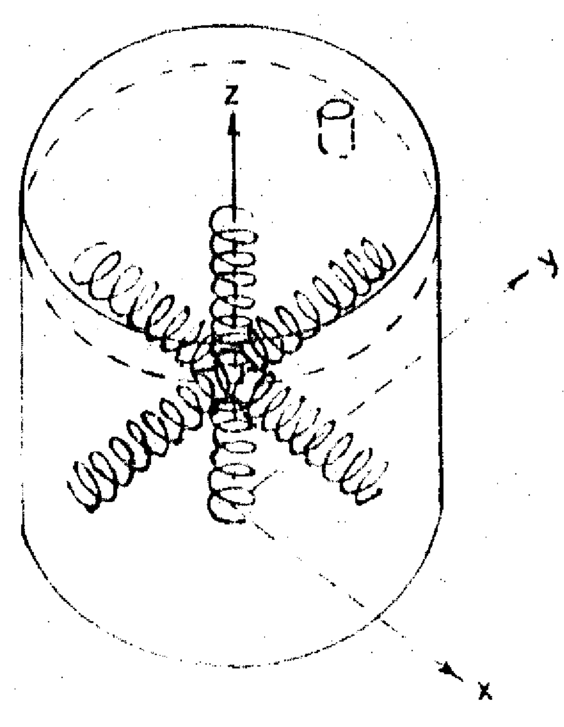

Fig. 4. Analogía de un elemento de arcilla saturada en donde se anula la tension neutral producida por evaporación superficial.

CAPITULO III

SOLUCION ANALITICA DEL PROBLEMA

1. Esfuerzos generados en una arcilla saturada por evaporación superficial

Consideremos el problema de consolidación unidimensional (Ref. 5) en una masa de arcilla saturada semi-infinita, $z > 0$, cuando la frontera se somete a una evaporación de intensidad constante Ie, siendo nulo el exceso de presión hidrostática inicial, $u = 0$, en todo el medio. Se requiere por lo tanto una solución de la ecuación diferencial

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \qquad \text{(III-1)}$$

satisfaciendo la condición de frontera

$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = I_e \qquad z = 0 \qquad t > 0 \qquad \text{(III-2)}$$

y la condición inicial

$$u = 0 \qquad z > 0 \qquad t = 0 \qquad \text{(III-3)}$$

donde

C_v = coeficiente de consolidación;
k = coeficiente de permeabilidad;
γ_w = peso específico del agua;
Ie = intensidad de evaporación.

Para encontrar la solución de este problema con valores en la frontera supondremos que durante el proceso de consolidación los términos k y Cv son constantes y u es mayor que u_o, siendo $-u_c$ la tensión máxima que puede desarrollarse en el agua intersticial sin que ésta pierda su continuidad.

La solución de este problema (Apendice A) es

$$u = -\frac{I_e \gamma_w}{k} \left[2 \left(\frac{c_v t}{\pi} \right)^{1/2} e^{-\frac{z^2}{4 c_v t}} - z \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{c_v t}} \right] \qquad \text{(III-4)}$$

Esta expresión se puede escribir en función de un parámetro x adimensional

$$u = - c\, z\, f(x) \qquad \text{(III-5)}$$

donde

$$c = \frac{I_0 \gamma_w}{k} \qquad \text{(III-6)}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\, x}\, e^{-x^2} - \operatorname{erfc} x \qquad \text{(III-7)}$$

$$x^2 = \frac{z^2}{4 c_v t} \qquad \text{(III-8)}$$

Cuando z tiende a cero para $t > 0$, la ecuación (III-5) tiene por límite la expresión

$$u = -\frac{2c}{\sqrt{\pi}} \sqrt{c_v t} \qquad \text{(III-9)}$$

La expresión (III-9) nos da la variación de u en la frontera expuesta a evaporación.

Es interesante encontrar la variación del nivel freático durante el proceso de evaporación superficial. Supongamos, por sencillez, que inicialmente dicho nivel coincidía con la superficie del terreno. La variación de él estará dada por la ecuación

$$u + \gamma_w z = 0 \qquad \text{(III-10)}$$

Sustituyendo el valor de u dado por la ecuación (III-5) y tomando en cuenta la expresión (III-6) se obtiene

$$f(x) = \frac{k}{I_0} \qquad \text{(III-11)}$$

Supongamos que x_0 es la raíz de la ecuación (III-11). Sustituyendo este valor en la expresión (III-8) se obtiene, finalmente

$$z_0 = 2 x_0 \sqrt{c_v t} \qquad \text{(III-12)}$$

donde z_0 es la profundidad en que la presión neutral es nula.

Es importante observar que z_0 es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo.

En las Figs. 5 y 6 aparecen la tabla y gráfica de la función $f(x)$ dada por (III-7).

Procedamos a encontrar los esfuerzos efectivos generados en la estructura sólida de la arcilla. Denotemos por σ_x, σ_y y σ_z los esfuerzos normales totales, por $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$ y $\bar{\sigma}_z$ los esfuerzos normales efectivos y por ϵ_x , ϵ_y y ϵ_z las deformaciones unitarias en las direcciones de los correspondientes ejes coordenados. Si u representa el exceso de presión hidrostática, u_h la presión hidrostática y $u_T = u_h + u$ la presión neutral, en todo punto de la masa de arcilla se cumplen las siguientes igualdades

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \bar{\sigma}_x + u_T \\ \sigma_y &= \bar{\sigma}_y + u_T \\ \sigma_z &= \bar{\sigma}_z + u_T \end{aligned} \qquad \text{(III-13)}$$

El caso de la arcilla saturada expuesta a evaporación superficial, es un problema de deformación unidimensional, en la dirección del eje coordenado z. Además, en todo momento, el valor de la presión vertical total σ_z en un punto considerado debe ser constante. Si consideramos un volumen cúbico elemental en la masa de arcilla semi-infinita, como se ilustra en la Fig. 7, se deben cumplir, por lo tanto, las siguientes condiciones

$$\sigma_z = \bar{\sigma}_z + u_T = \gamma_m\, Z \qquad \text{(III-14)}$$

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{1}{E}\left[\bar{\sigma}_x - \mu(\bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z)\right] = 0 \qquad \text{(III-15)}$$

donde E y μ son el módulo de elasticidad y la relación de Poisson respectivamente, correspondientes a la estructura del material sólido de la arcilla y γ_m es el peso específico de la arcilla saturada.

Estas condiciones determinan los esfuerzos efectivos en la estructura sólida de la arcilla como sigue

$$\bar{\sigma}_z = \gamma_m Z - u_T = \gamma_m'\, Z - u \qquad \text{(III-16)}$$

$$\bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_y = \frac{\mu}{1-\mu}\left(\gamma_m' Z - u\right) \qquad \text{(III-17)}$$

donde γ_m' es el peso específico sumergido de la arcilla saturada.

Para un caso más general, en que el suelo pudiera ser preconsolidado y los esfuerzos efectivos horizontales iniciales (u=0) no correspondan a los dados por la expresión (III-17), es conveniente escribir dicha expresión en la forma

$$\bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_y = k_1\, \gamma_m' Z - \frac{\mu_1}{1-\mu_1}\, u \qquad \text{(III-18)}$$

donde K_i es el coeficiente de presión en reposo de la arcilla en el momento de iniciarse la evaporación y μ_c la relación de Poisson de la estructura de la arcilla durante el proceso de carga.

Los esfuerzos efectivos en la estructura de la arcilla después que la evaporación superficial ha estado actuando por un tiempo t estarán dadas por las expresiones

$$\overline{\sigma}_{z_1} = \gamma_m' z + c z f(x) \tag{III-19}$$

$$\overline{\sigma}_{x_1} = \overline{\sigma}_{y_1} = K_0 \gamma_m' z + \frac{\mu_c}{1-\mu_c} c z f(x) \tag{III-20}$$

Conviene hacer notar que en el caso más general, μ_c no será constante, sino que podrá ser función de z y de $\overline{\sigma}_z$.

2. <u>Esfuerzos inducidos en una arcilla saturada al anular la tension neutral producida por evaporación superficial</u>

Consideremos el volumen cúbico elemental de la sección anterior (Fig. 7), pero ahora situado en la superficie, es decir, z = 0, y anulemos la presión capilar formando una lámina de agua superficial.

En este elemento el estado de esfuerzos antes de anular la presión capilar está dado por las ecuaciones

$$\overline{\sigma}_{z_1} = -u \tag{III-21}$$

$$\overline{\sigma}_{x_1} = \overline{\sigma}_{y_1} = -\frac{\mu_c}{1-\mu_c} u \tag{III-22}$$

Como σ_z debe ser constante (para este elemento σ_z es nulo), el efecto de anular la tensión neutral es equivalente a aplicar una tensión vertical de igual magnitud a la estructura sólida de la arcilla, es decir

$$\overline{\sigma}_{z_2} = u \tag{III-23}$$

Como existe confinamiento lateral, nuevamente se debe cumplir con las condiciones $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_y = 0$. Procediendo en forma análoga a la sección anterior se encuentra que los esfuerzos horizontales debidos a la tensión $\overline{\sigma}_{z_2}$=u están dados por

$$\overline{\sigma}_{x_2} = \overline{\sigma}_{y_2} = \frac{\mu_d}{1-\mu_d} u \tag{III-24}$$

donde μ_d es la relación de Poisson de la estructura de la arcilla durante el proceso de descarga.

El estado final de esfuerzos en el elemento de arcilla saturada considerado será el resultado de la superposición de los estados 1 y 2, dados por las ecuaciones (III-21 y 22) y (III-23 y 24)

$$\bar{\sigma}_{z3} = \bar{\sigma}_{z1} + \bar{\sigma}_{z2} = -u + u = 0 \qquad \text{(III-25)}$$

$$\bar{\sigma}_{x3} = \bar{\sigma}_{y3} = \left(\frac{\mu_d}{1-\mu_d} - \frac{\mu_c}{1-\mu_c}\right) u \qquad \text{(III-26)}$$

La grieta se iniciará en la superficie si

$$\frac{\mu_d}{1-\mu_d} > \frac{\mu_c}{1-\mu_c} \qquad \text{(III-27)}$$

es decir, siempre que

$$\mu_d > \mu_c \qquad \text{(III-28)}$$

Una vez iniciada la grieta, ésta progresará en longitud y profundidad siempre que la anulación de la tensión neutral tenga por resultado tensiones horizontales efectivas, pues los elementos de arcilla situados en la frontera inferior de la grieta estarán en condiciones similares al de la superficie al fluir el agua libre dentro de ella, además de existir, seguramente, una concentración del esfuerzo de tensión en la frontera inferior de ella (efecto que no se analiza en este trabajo).

Para encontrar la profundidad hasta donde progresará la grieta consideremos el volumen cúbico elemental de la sección anterior (Fig.6) situado a la profundidad z. El estado de esfuerzos efectivos antes de anular la tensión neutral está dado por las ecuaciones (III-19 y 20). Al anular el exceso de presión hidrostática (tensión), los esfuerzos efectivos generados estarán dados por

$$\bar{\sigma}_{z2} = u = -c\,z\,f(x) \qquad \text{(III-29)}$$

$$\bar{\sigma}_{x2} = \bar{\sigma}_{y2} = \frac{\mu_d}{1-\mu_d}\,u = -\frac{\mu_d}{1-\mu_d}\,c\,z\,f(x) \qquad \text{(III-30)}$$

El estado final de esfuerzos será

$$\bar{\sigma}_{z3} = \bar{\sigma}_{z1} + \bar{\sigma}_{z2} = \gamma_m'\,z \qquad \text{(III-31)}$$

$$\bar{\sigma}_{x3} = \bar{\sigma}_{y3} = K_0\,\gamma_m'\,z - \left(\frac{\mu_d}{1-\mu_d} - \frac{\mu_c}{1-\mu_c}\right) c\,z\,f(x) \qquad \text{(III-32)}$$

La grieta se profundizará, o al menos se presentará abierta, mientras el segundo término de la ecuación (III-32) sea mayor que el primero.

En la expresión anterior, ecuación (III-32), como en la ecuación (III-26), se requiere que se cumpla la desigualdad (III-28) para que puedan existir esfuerzos efectivos de tensión en sentido horizontal. A ésto respecto no existen, hasta la fecha, mediciones confiables de los valores de μ_c y μ_d, debido a la dificultad de determinarlos en el laboratorio, pudiéndose afirmar, sin embargo, que en arcillas del tipo de las del valle de México la relación (III-28) se cumple, pues a esfuerzos de compresión presenta alta compresibilidad y propiedades plásticas, mientras que en el proceso de descarga no presenta características expansivas importantes siendo la recuperación volumétrica, en gran parte, del tipo elástico.

3. Esfuerzos generados por fuerzas exteriores en una masa de arcilla saturada no confinada

Consideremos nuevamente un volumen cúbico elemental de arcilla saturada, pero supongamos ahora que dicho elemento carece en lo absoluto de confinamiento lateral, como se ilustra en la Fig. 8. Apliquemos a este elemento una presión vertical total p en forma rápida y supongamos que las partículas sólidas y el agua son incompresibles. La presencia del agua requiere que no ocurra cambio volumétrico, por lo que se debe cumplir la ecuación

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \qquad \text{(III-33)}$$

Suponiendo que la arcilla es homogénea e isótropa, se tendrán las mismas E y μ en todos los puntos y direcciones y la ecuación (III-33) se puede escribir

$$\left[\bar{\sigma}_x - \mu(\bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z)\right] + \left[\bar{\sigma}_y - \mu(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_z)\right] + \left[\bar{\sigma}_z - \mu(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y)\right] = 0 \qquad \text{(III-34)}$$

es decir

$$(1 - 2\mu)(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z) = 0 \qquad \text{(III-35)}$$

donde $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$ y $\bar{\sigma}_z$ representan los esfuerzos efectivos debidos al esfuerzo p.

En el caso de materiales como la arcilla que son compresibles y expansibles en mayor o menor grado, las relaciones de Poisson μ_c y μ_d son ambas distintas de 0.5, por lo que la ecuación (III-35) se reduce a

$$\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_y + \bar{\sigma}_z = 0 \qquad \text{(III-36)}$$

Además se deben cumplir las condiciones

$$\sigma_x = \sigma_y = 0 \qquad \sigma_z = p \qquad \text{(III-37)}$$

Usando el símbolo u para el exceso de presión hidrostática debido al esfuerzo p, las ecuaciones (III-37) se pueden escribir

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x + u &= \bar{\sigma}_y + u = 0 \\ \bar{\sigma}_z + u &= p \end{aligned} \qquad \text{(III-38)}$$

es decir

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \bar{\sigma}_y = -u \\ \bar{\sigma}_z &= p - u \end{aligned} \qquad \text{(III-39)}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (III-36) se obtiene

$$u = \frac{p}{3} \qquad \text{(III-40)}$$

por lo que los esfuerzos efectivos tienen los valores

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \bar{\sigma}_y = -\frac{p}{3} \\ \bar{\sigma}_z &= \frac{2}{3} p \end{aligned} \qquad \text{(III-41)}$$

Las ecuaciones (III-40 y 41) dan los esfuerzos efectivos y neutral en el elemento considerado al aplicar la presión p. Los esfuerzos efectivos son de compresión en sentido vertical y de tensión en sentido horizontal. La presión p ha sido tomada tanto por el agua intersticial como por la estructura sólida de la arcilla.

En el caso general de existir los 3 esfuerzos exteriores p_x, p_y, p_z, es fácil llegar a las ecuaciones siguientes

$$u = \frac{p_x + p_y + p_z}{3} \qquad \text{(III-42)}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \frac{1}{3}\left[2 p_x - (p_y + p_z)\right] \\ \bar{\sigma}_y &= \frac{1}{3}\left[2 p_y - (p_x + p_z)\right] \\ \bar{\sigma}_z &= \frac{1}{3}\left[2 p_z - (p_x + p_y)\right] \end{aligned} \qquad \text{(III-43)}$$

Estas ecuaciones pueden ser útiles al considerar la distribución inicial de esfuerzos en las pruebas de compresión simple y triaxiales de laboratorio al aplicar las cargas desviadoras, y probablemente también en el caso de medios de arcilla saturada sujetos a cargas superficiales.

En el apéndice B se incluye la solución de este problema haciendo uso del cálculo tensioral, contenida en la Ref. 6.

x	$2x$	$2\pi^{-1/2} e^{-x^2}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi}\,x} e^{-x^2}$	erfc x	$f(x)$
0.00	0.00	1.1284	∞	1.0000	∞
0.05	0.10	1.1256	11.2560	0.9436	10.3124
0.10	0.20	1.1172	5.5860	0.8875	4.6985
0.15	0.30	1.1033	3.6777	0.8320	2.8457
0.20	0.40	1.0841	2.7102	0.7773	1.9329
0.25	0.50	1.0600	2.1200	0.7237	1.3963
0.30	0.60	1.0313	1.7188	0.6714	1.0474
0.35	0.70	0.9983	1.4261	0.6206	0.8055
0.40	0.80	0.9615	1.2019	0.5716	0.6303
0.45	0.90	0.9215	1.0239	0.5245	0.4994
0.50	1.00	0.8788	0.8788	0.4795	0.3993
0.55	1.10	0.8338	0.7580	0.4367	0.3213
0.60	1.20	0.7872	0.6560	0.3961	0.2599
0.65	1.30	0.7395	0.5688	0.3580	0.2108
0.70	1.40	0.6913	0.4937	0.3222	0.1715
0.75	1.50	0.6429	0.4286	0.2888	0.1398
0.80	1.60	0.5950	0.3719	0.2579	0.1140
0.85	1.70	0.5479	0.3223	0.2293	0.0930
0.90	1.80	0.5020	0.2789	0.2031	0.0758
0.95	1.90	0.4576	0.2408	0.1791	0.0617
1.00	2.00	0.4151	0.2075	0.1573	0.0502
1.10	2.20	0.3365	0.1529	0.1198	0.0331
1.20	2.40	0.2673	0.1114	0.0897	0.0217
1.30	2.60	0.2082	0.0801	0.0660	0.0141
1.40	2.80	0.1589	0.0567	0.0477	0.0090
1.50	3.00	0.1189	0.0396	0.0339	0.0057
1.60	3.20	0.0872	0.0272	0.0236	0.0036
1.70	3.40	0.0627	0.0184	0.0162	0.0022
1.80	3.60	0.0442	0.0123	0.0109	0.0014
1.90	3.80	0.0305	0.00803	0.00721	0.00082
2.00	4.00	0.0207	0.00517	0.00467	0.00050
2.10	4.20	0.0137	0.00326	0.00298	0.00028
2.20	4.40	0.0089	0.00202	0.00186	0.00016
2.30	4.60	0.0057	0.00124	0.00114	0.00010
2.40	4.80	0.0036	0.00075	0.00069	0.00006
2.50	5.00	0.0022	0.00044	0.00041	0.00003
2.60	5.20	0.0013	0.00025	0.00023	0.00002
2.70	5.40	0.0008	0.00015	0.00013	0.00002
2.80	5.60	0.0004	0.00007	0.00007	0.00001
2.90	5.80	0.0003	0.00005	0.00004	0.00001
3.00	6.00	0.0001	0.00002	0.00002	0.000012

Fig. 5. Tabla de la función $f(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\,x} e^{-x^2} - \mathrm{erfc}\, x$

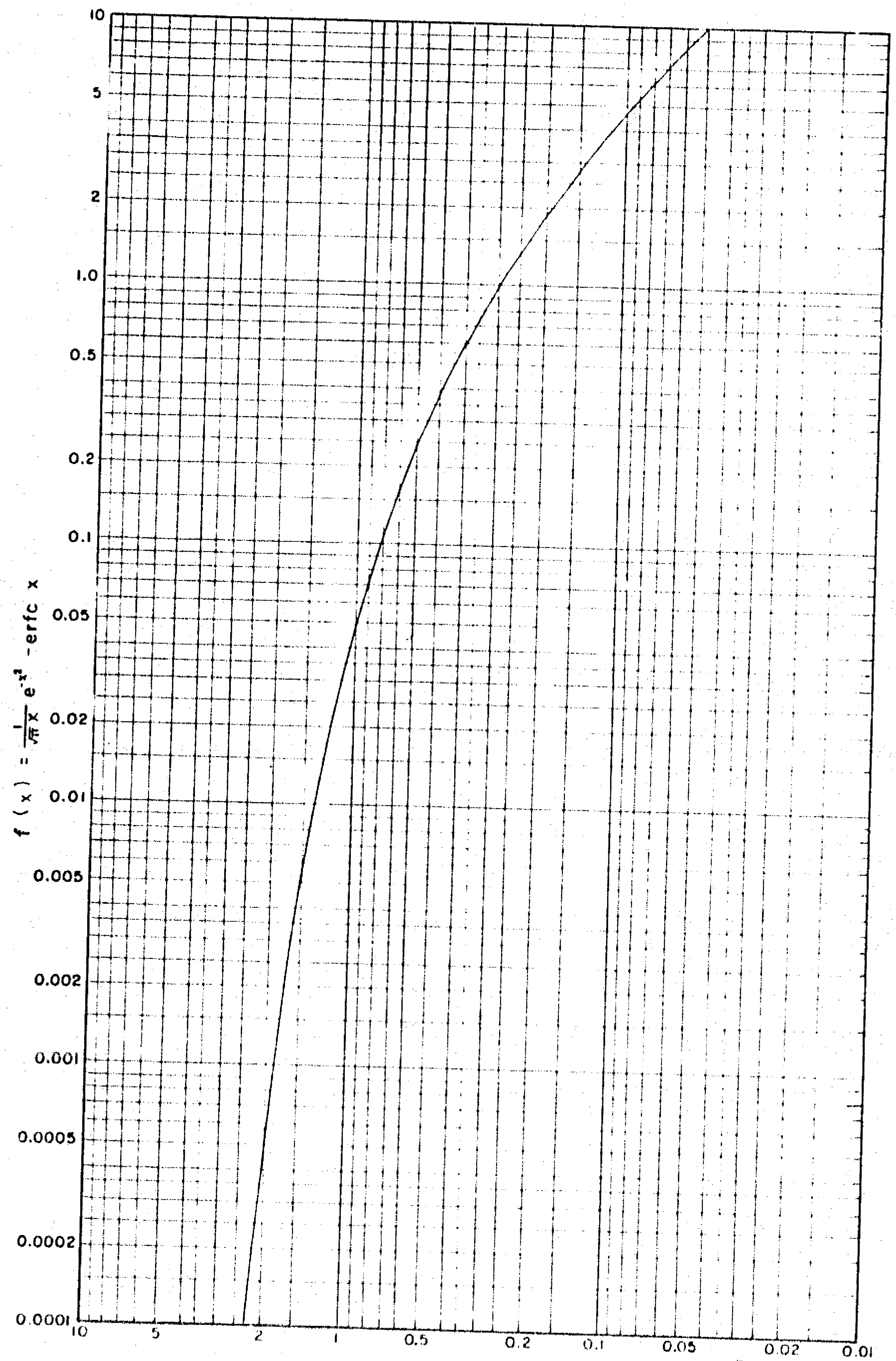

Fig. 6 Gráfica de la función f (x) $X = \frac{Z}{2\sqrt{C_v t}}$

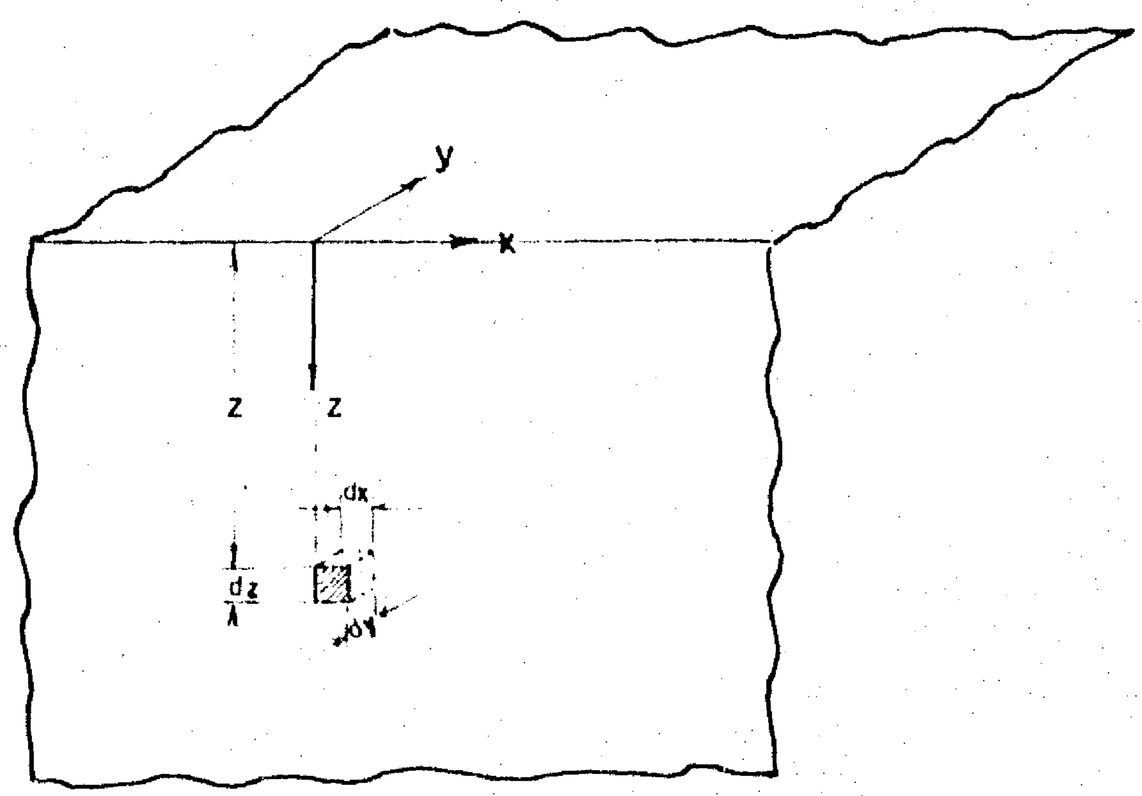

Fig. 7. Volumen cúbico elemental a la profundidad z en una masa de arcilla saturada.

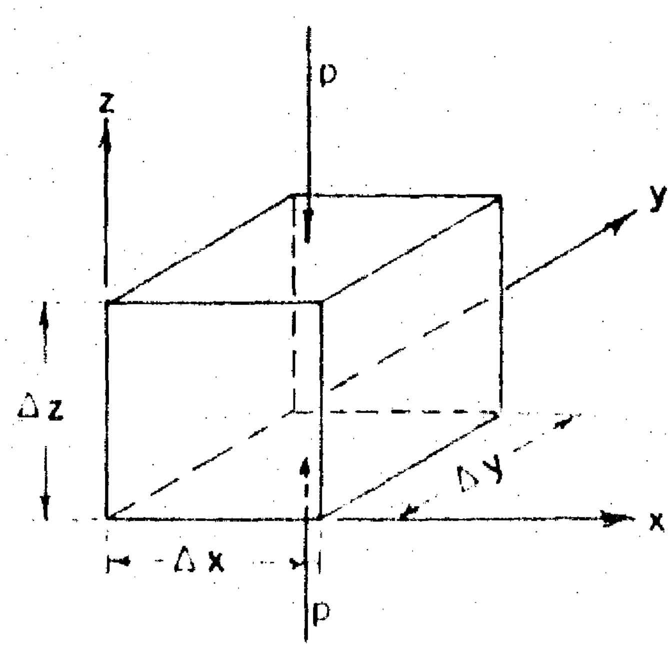

Fig. 8. Volumen cúbico elemental no confinado de arcilla saturada sometido a la presión exterior p

CAPITULO IV

APLICACION DE LA TEORIA AL CASO DE LAS GRIETAS EN EL LECHO DEL ANTIGUO LAGO DE TEXCOCO

Apliquemos ahora los resultados obtenidos en el capítulo anterior al caso de las grietas en el lecho del antiguo lago de Texcoco.

Las características físicas para la parte superior del depósito de arcilla son las siguientes, (Ref. 7).

$$\begin{aligned} S_s &= 2.6 \\ e &= 9.0 \\ k &= 10^{-7}\ \text{cm/seg} = 3.16\ \text{cm/año} \\ C_v &= 10^{-3}\ \text{cm}^2/\text{seg} = 3.16\ \text{m}^2/\text{año} \end{aligned} \tag{IV-1}$$

La intensidad de evaporación media anual en el lugar es de 200 cm. (Ref. 8).

Con estos valores la constante C dada por la ecuación (III-6) resulta ser

$$C = 0.06342\ \text{Kg/cm}^2 \tag{IV-2}$$

y la ecuación (III-5) puede escribirse

$$u = -6.342\ z\ F(x)\ \text{Kg/cm}^2\ ; \quad z \text{ en m.} \tag{IV-3}$$

El parámetro adimensional x dado por la ecuación (III-8) resulta ser

$$x = 0.2816\ \frac{z}{\sqrt{t}}\ ; \quad z \text{ en m, } t \text{ en años.} \tag{IV-4}$$

Sustituyendo este valor en la ecuación (IV-3) obtenemos finalmente

$$u = -6.342\ z\ F\left(0.2816\ \frac{z}{\sqrt{t}}\right)\ \text{Kg/cm}^2,\ z \text{ en m},\ t \text{ en años} \tag{IV-5}$$

que da la tensión producida en el agua intersticial en el tiempo t y a la profundidad z.

En la Fig. 9 se presentan gráficas de u en función de la profundidad para diferentes tiempos.

Aplicando las ecuaciones (III-11 y 12) podemos encontrar la variación del nivel freático. Sustituyendo los valores de k e I_c dados anteriormente se obtiene la ecuación

$$f(x) = 0.016 \tag{IV-6}$$

La raíz de esta ecuación puede obtenerse gráficamente de la Fig. 6 dando

$$x_c = 1.20 \tag{IV-7}$$

Con este valor de x_c y el de C_v contenido en (IV-1) se obtiene finalmente

$$z_c = 4.6\sqrt{t} \; m, \quad t \text{ en años.} \tag{IV-8}$$

La expresión (IV-8) expresa que el nivel freático habrá descendido 4.6 m. en el primer año de evaporación superficial y 9.2 m. a los 4 años de dicho proceso.

Con el objeto de valuar los esfuerzos horizontales, supongamos además que en la ecuación (III-32) la constante K_o=0.5 y los valores de μ_c y μ_d son tales que

$$\frac{\mu_d}{1-\mu_d} - \frac{\mu_c}{1-\mu_c} = 0.5 \tag{IV-9}$$

El valor de γ_m' con los datos (IV-1) resulta ser 0.16 $^{T}/_{m^3}$= 0.000160 $^{Kg}/_{cm^3}$.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (III-32) se tiene finalmente

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0.0082 - 3.171\, z\, f\left(0.2316 \frac{z}{\sqrt{t}}\right) {}^{Kg}/_{cm^2}, \; z \text{ en m}, \; t \text{ en años.} \tag{IV-10}$$

En la Fig. 10 se han trazado las gráficas del primer y segundo términos de la expresión anterior.

Se observa que para t = 1 año, pueden existir tensiones hasta la profundidad de 6 m, y para t = 4 años, hasta los 12 m, por lo que las grietas se abrirán hasta dicha profundidad.

Es interesante hacer notar que la profundidad que interesa la grieta es mayor que la profundidad del nivel freático; esto será así en todo caso donde $K_o \gamma'_m < \gamma_w$.

En las Figs.11 a 16 aparecen diferentes fotografías de las grietas en el lecho del antiguo lago de Texcoco.

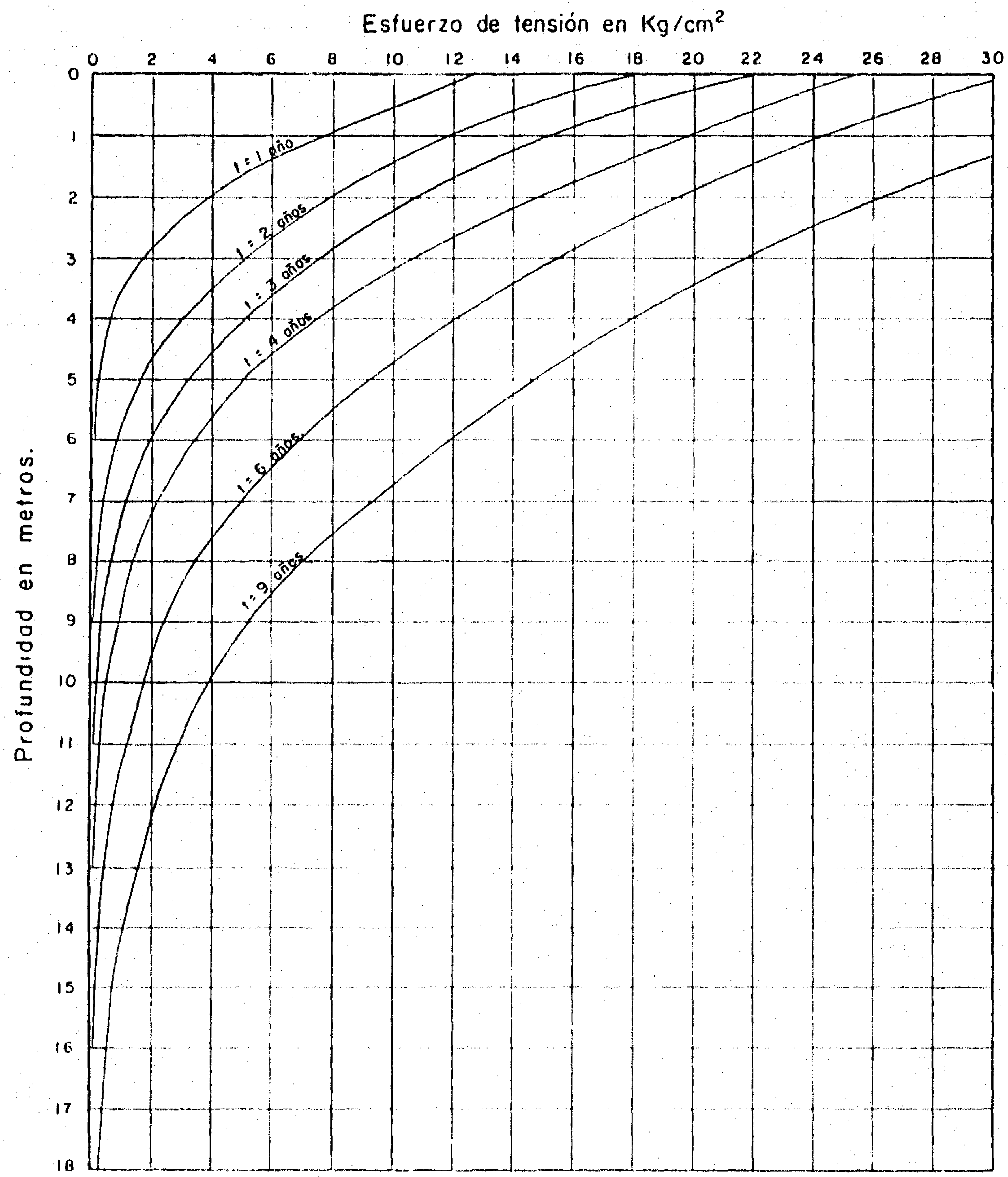

Fig 9. Gráfica de las tensiones neutrales inducidas por evaporación superficial en función de la profundidad a distintos tiempos en la arcilla saturada del lecho del antiguo lago de Texcoco.

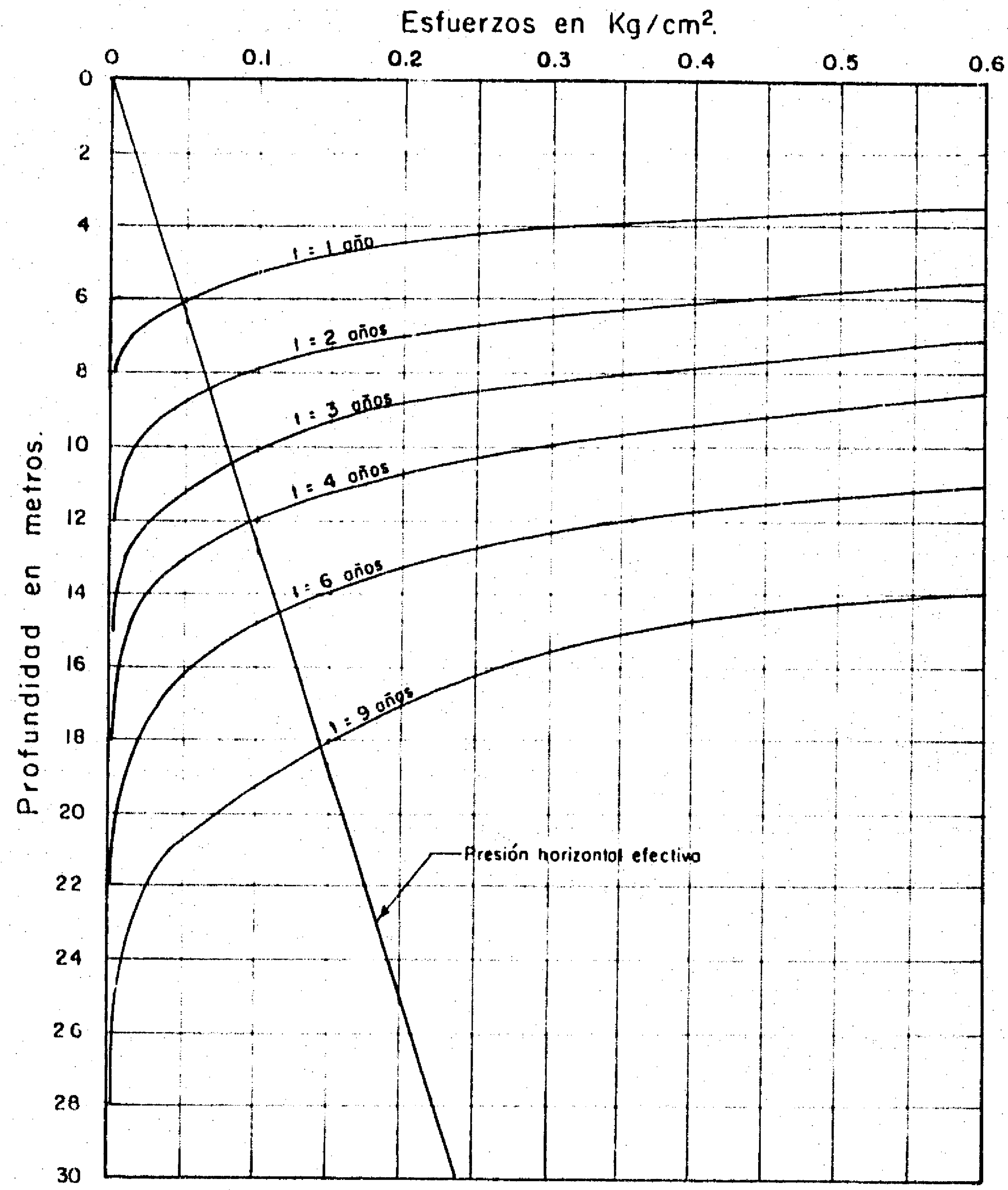

Fig. 10. Gráfica de las tensiones horizontales efectivas inducidas en función de la profundidad a distintos tiempos en la arcilla saturada del lecho del antiguo lago de Texcoco.

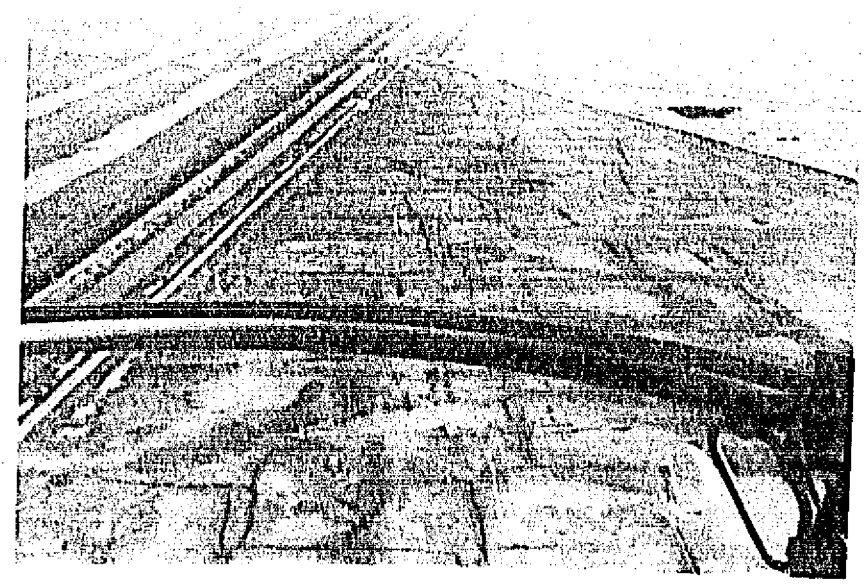

Fig. 11. Fotografía aérea de una retícula de grietas localizada cerca del evaporador helicoidal "El Caracol".

Fig. 12. Fotografía de una grieta localizada entre las pistas del Aeropuerto Central.

Fig. 13. Fotografía de una grieta localizada entre las pistas del Aeropuerto Central. El agua de lluvia inundó el pozo a cielo abierto excavado posteriormente a la formación de ella.

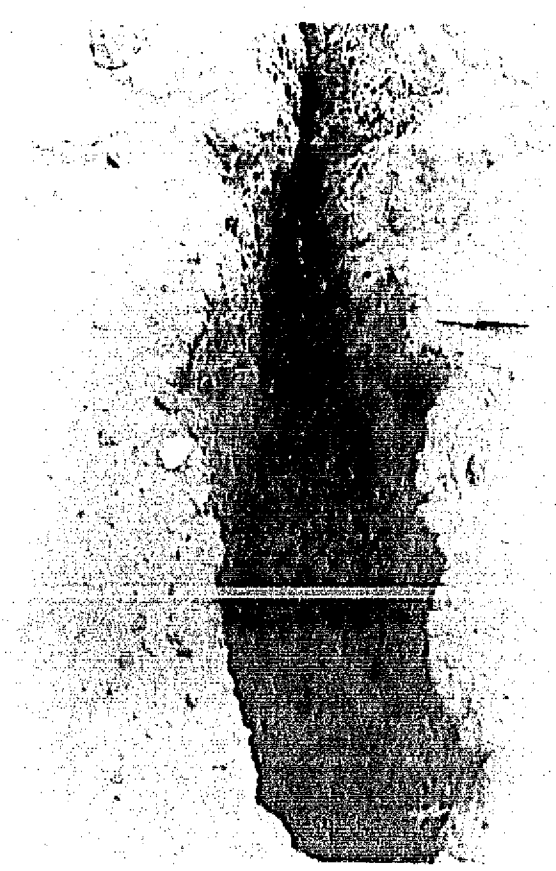

Fig. 14. Fotografía de cerca de una grieta entre las pistas del Aeropuerto Central que muestra derrumbes en las paredes de ella.

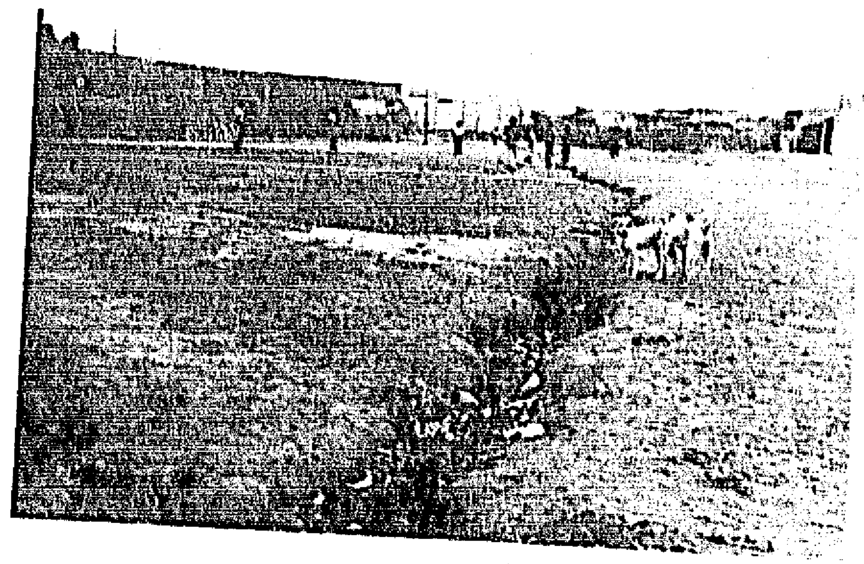

Fig. 15. Fotografía de una grieta localizada en la zona poblada de la Col. Oriental.

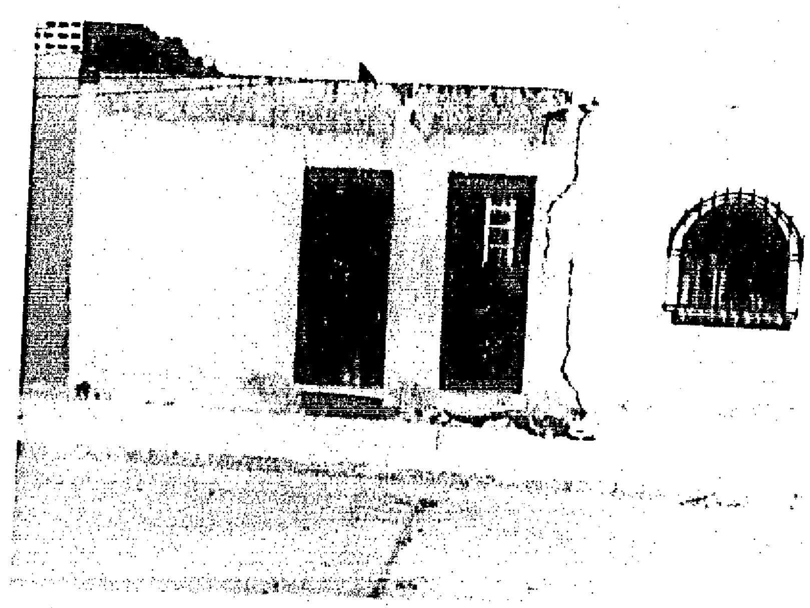

Fig. 16. Fotografía de una casa habitación afectada por una grieta localizada en la Col. Panamericana.

CAPITULO V

PUNTOS PRINCIPALES QUE REQUIEREN INVESTIGACION

Los puntos que requieren investigación se refieren principalmente a encontrar las discrepancias entre el fenómeno real y el teórico por evaluación de las desviaciones que se presenten en las distintas hipótesis simplificatorias consideradas en el análisis, introduciendo en la teoría, en caso necesario, los factores necesarios para disminuir los errores cometidos.

Las hipótesis consideradas en el análisis son las siguientes:

1. <u>Hipótesis de la consolidación unidimensional</u>.

   a) Suelo homogéneo e isótropo.
   b) Agua y suelo incompresibles.
   c) Suelo totalmente saturado.
   d) Variación de la relación de vacíos suficientemente pequeña de tal manera que un cierto valor de z pueda suponerse constante durante todo el proceso de consolidación.
   e) k, a_v, c_v constantes durante todo el proceso de consolidación.

Estas hipótesis han sido discutidas ampliamente (Ref. 5) pudiéndose afirmar que la concordancia entre los resultados teóricos y las observaciones reales ha sido bastante buena para la mayoría de las arcillas cuando éstas están sujetas a cargas no muy grandes. En nuestro caso, las presiones a que puede estar sometido el suelo son mayores que las consideradas comunmente en el cálculo de asentamientos, por lo que es de esperarse que las variaciones en e, k, a_v y c_v sean importantes y puedan afectar los resultados teóricos obtenidos.

2. <u>I_o constante durante todo el proceso de consolidación.</u>

Aparte de las variaciones diarias de I_o y las debidas a las estaciones del año, la intensidad de evaporación disminuye al aumentar la tensión del agua intersticial. Un análisis más real debe tomar en cuenta estos factores.

3. <u>Continuidad en el agua intersticial ($u > u_c$) durante todo el proceso de consolidación</u>.

En muchos suelos la zona de saturación total contiene una cierta cantidad de gas libre (comunmente aire) en estado discontinuo. Terzaghi (Ref. 9) distingue dos tipos de partículas gaseosas: burbujas y vacíos, las primeras son las que están totalmente rodeadas de agua y las segundas son aquellas cuya frontera consiste en meniscos independientes separados entre sí por superficies de partículas sólidas.

A una temperatura dada la presión del gas en una burbuja depende exclusivamente del peso de gas contenido en ella y del esfuerzo en el agua, mientras que la presión en un vacío depende también del acomodo de las partículas sólidas que lo rodean.

Suponiendo que el peso del gas en la burbuja es independiente del estado de esfuerzos en el agua, Terzaghi encuentra la siguiente ecuación que relaciona la magnitud de la burbuja con el esfuerzo en el agua

$$u = \frac{r_0^3}{r^3}\left(u_0 + \frac{2T_s}{r_0}\right) - \frac{2T_s}{r} \qquad \text{(V-I)}$$

donde

u = $u_w + p_a$ = presión real en el agua
u_w = presión hidrostática en el agua
p_a = presión atmosférica
r = radio de la burbuja
r_0 = radio inicial de la burbuja
u_0 = presión real en el agua para $r=r_0$
T_s = tensión superficial

Asímismo, Terzaghi encuentra que para

$$r = r_1 = r_0\sqrt{3}\,\sqrt{\frac{r_0 u_0}{2T_s} + 1} \qquad \text{(V-2)}$$

la velocidad de incremento del radio de la burbuja llega a ser igual a infinito. En este caso la presión real u_1 en el agua es

$$u_1 = -\frac{4}{3}\,\frac{T_s}{r_1} \tag{V-3}$$

y la presión hidrostática correspondiente es

$$u_{w_1} = u_1 - p_a = -\left(\frac{4}{3}\,\frac{T_s}{r_1} + p_a\right) \tag{V-4}$$

Tan pronto como la presión hidrostática en el agua toma el valor u_{w_1} la burbuja se expande hasta convertirse en un vacío de la magnitud del hueco entre las partículas sólidas del suelo.

Al desarrollarse tensiones en el agua, las partículas gaseosas mayores se expanderán a vacíos y al crecer la tensión continuará este fenómeno en las partículas menores. La tensión requerida para iniciar este proceso depende del estado inicial de esfuerzos en el agua y del tamaño de las partículas gaseosas más grandes.

Para valores de u_0 cercanos a una atmósfera y de r_0 menores de 10^{-4} cm la expresión (V-2) puede escribirse

$$r_1 \doteq 2\,r_0 \tag{V-5}$$

y la expresión (V-3) toma el valor

$$u_1 \doteq -\frac{2\,T_s}{2\,r_0} \tag{V-6}$$

Como T_s =0.076 gr/cm la expresión (V-6) puede escribirse

$$u_1 \doteq -\frac{0.05}{r_0}\ \mathrm{g/cm^2}\ ,\quad r_0 \text{ en cm} \tag{V-7}$$

Tomando en cuenta, en nuestro caso, que el tamaño de las partículas sólidas de la arcilla del lecho del antiguo lago de Texcoco son del orden de 0.1 μ =10^{-5}cm. (Ref. 7), consideremos que las burbujas mayores que contiene son de este mismo orden de magnitud con lo que resulta u_1=-5 Kg/cm^2 es decir, una tensión hidrostática de 6 Kg/cm^2 y las burbujas mayores duplicarán aproximadamente su diámetro, antes de convertirse en vacíos, por lo que el volumen gaseosos si apenas se duplicará.

Para burbujas menores de 10^{-5} cm.; el valor de la tensión en el agua requerido para iniciar el proceso de formación de vacíos crecerá inversamente proporcional al radio inicial de ellas.

Es interesante observar que el momento en que principia el proceso de conversión de burbujas a vacíos, puede considerarse como la iniciación de la pérdida de continuidad en el agua.

Para la formación de las grietas de tensión analizadas en este trabajo es necesario no se haya iniciado la formación de vacíos o, al menos, que no esté muy avanzado. Una vez iniciado el proceso de conversión de burbujas a vacíos, se iniciará lo que podría denominarse verdadero agrietamiento por secado, el cual progresará al aumentar los vacíos debido a los esfuerzos de tensión generados localmente en la estructura sólida de la arcilla por los meniscos formados.

Según lo expresado anteriormente, los suelos que contengan alto contenido gaseoso tendrán menor capacidad para desarrollar grietas de tensión, entre éstos podrían contarse las arcillas orgánicas. Además la temperatura probablemente juega un papel importante en este fenómeno.

Por otra parte, se considera que $-u_{w1} = -(u_1 - p_a)$ es menor que la presión requerida para llevar a una arcilla a su límite de contracción, es decir, que la parte final del proceso de contracción ocurre con un alto contenido volumétrico gaseoso. Este aspecto requiere investigación experimental.

En el caso de las arcillas del valle de México, suponiendo que el diámetro mínimo de los poros es del mismo orden de magnitud que las partículas sólidas de arcilla (10^{-5} cm.) resulta una presión capilar potencial de 30 Kg/cm^2, valor que parece razonable al considerar que muestras consolidadas en el laboratorio a una presión de 20 Kg/cm^2 muestran una contracción adicional al exponerlas al secado.

4. Arcilla normalmente consolidada.

La influencia que tiene la preconsolidación y el efecto de repetición de carga en los valores de E y μ es uno de los puntos que más campo ofrece a la investigación experimental. Como este aspecto está relacionado íntimamente con la consolidación y las pruebas triaxiales de laboratorio, los valores que se obtengan de pruebas realizadas para el efecto se verán afectados por el aún incompleto conocimiento del verdadero comportamiento de la arcilla en dichos procesos. Las pruebas triaxiales deberán ir acompañadas de mediciones precisas de presiones neutrales del agua intersticial y deberá contarse con un mejor conocimiento sobre la migración del agua y evolución del estado de esfuerzos efectivos y neutrales en las pruebas rápidas consolidadas al aplicar los esfuerzos desviadores. Se anticipa que dichos experimentos podrán dar resultados confusos si no se analizan e interpretan correctamente.

Los valores de E y μ no son independientes del coeficiente de reducción volumétrico m_v. La relación que los liga puede obtenerse con las siguientes consideraciones.

En una prueba de consolidación unidimensional se tiene confinamiento lateral, por lo que

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{1}{E}\left[\bar{\sigma}_x - \mu\left(\bar{\sigma}_x + \bar{\sigma}_z\right)\right] = 0 \qquad \text{(V-8)}$$

ya que $\bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_y$. Por lo tanto, se debe cumplir la relación

$$\bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_y = \frac{\mu}{1-\mu}\,\bar{\sigma}_z \qquad \text{(V-9)}$$

La deformación unitaria ε_z es igual a

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left[\bar{\sigma}_z - 2\mu\bar{\sigma}_x\right] = \frac{\bar{\sigma}_z}{E}\left[1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu}\right] \qquad \text{(V-10)}$$

El coeficiente de reducción volumétrico está dado por

$$m_v = \frac{a_v}{1+e} = \frac{\Delta e}{1+e}\,\frac{1}{\bar{\sigma}_z} = \frac{\varepsilon_z}{\bar{\sigma}_z} \qquad \text{(V-11)}$$

Sustituyendo en (V-11) el valor de ε_z dado por (V-10) se obtiene

$$E\,m_v = 1 - \frac{2\mu^2}{1-\mu} \qquad \text{(V-12)}$$

Como el valor de μ es menor de 0.5, el producto Em_v resulta ser siempre menor que la unidad. Para meteriales incompresibles (μ=0.5) el valor de m_v es nulo y para materiales con valor de μ=0, el coeficiente de reducción volumétrico resulta ser igual al inverso del módulo de elasticidad.

Se considera que, por el presente, la ecuación (V-12), más que para obtener μ a partir de E y m_v, puede ser útil para verificar los valores experimentales de E y m_v, pues acota a la unidad el valor del producto de ellos.

En la investigación de E y μ seguramente llegarán a definirse diversos E y μ aparentes. Primeramente se tendrán 2 grupos: los correspondientes al período de carga y los del período de descarga, y cada grupo podría constar de 6 elementos: los correspondientes a cada prueba de compresión triaxial de laboratorio. Estas definiciones serán análogas a las de "ángulo de fricción y cohesión aparentes" en las pruebas enumeradas.

Por otra parte, en la expresión (III-32) no se incluye la resistencia a la tensión que pudiera considerársele a la arcilla por efecto de "verdadera cohesión" y que pudiera tener un valor no despreciable en arcillas pre-consolidadas. Este factor deberá tenerse en cuenta al considerar la profundidad interesada por las griotas.

La frecuencia de la formación de grietas en algunas zonas del lecho del lago de Texcoco parece ser de una vez cada 3 ó 4 años. El hecho de que no se formen todos los años parece tener explicación en los valores de los parámetros de la ecuación (III-32). Debido a la preconsolidación de la arcilla superficial por períodos de evaporación anteriores, K_0 puede tener un valor grande y puede llegar a requerirse un lapso de dos o más años para que el valor de $f(x)$ logre hacer que el segundo término de dicha expresión iguale al primero. A este respecto podría realizarse una investigación experimental en un área previamente escogida y preparada para someterse a evaporación e inundarla para forzar el agrietamiento.

El agrietamiento parece también afectar zonas que prácticamente están constantemente bajo el agua. Dicho aspecto deberá investigarse tanto teórica como experimentalmente.

CAPITULO VI
RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una teoría de las grietas de tensión que se forman en algunas zonas del valle de México al iniciarse la temporada de lluvias cada año. El proceso del agrietamiento se atribuye a los esfuerzos horizontales de tensión inducidos en la estructura sólida del suelo por la anulación de la tensión neutral, producida por una fuerte y prolongada evaporación, al depositarse una lámina de agua superficial.

El trabajo consta de 6 capítulos (incluyendo éste) y 3 apéndices. El capítulo I contiene una breve descripción del agrietamiento. En el capítulo II se expone una analogía del proceso de evaporación superficial y del efecto producido en el suelo por la anulación de las tensiones neutrales.

El capítulo III contituye la parte esencial del trabajo. Este capítulo contiene la solución analítica del problema. Las hipótesis principales consideradas en la resolución fueron las siguientes:

1. Las hipótesis de la consolidación unidimensional;
2. Intensidad de evaporación constante;
3. Continuidad en el agua intersticial;
4. Arcilla normalmente consolidada.

Con estas hipótesis se encontraron las tensiones neutrales producidas por la evaporación superficial en un medio arcilloso semi-infinito, las cuales están dadas por la ecuación (III-4) o por su equivalente, las ecuaciones (III-5 a 8). La evolución del nivel freático durante el proceso de evaporación está dada por la expresión (III-12). Los esfuerzos efectivos generados por la evaporación sobre la estructura sólida de la arcilla están dados por las expresiones (III-19 y 20). Al anular las tensiones neutrales debidas a la evaporación superficial se inducen los esfuerzos efectivos dados por las expresiones (III-29 y 30), los que superpuestos a los anteriores dan el estado final de esfuerzos efectivos expresados por las ecuaciones (III-31 y 32). Las expresiones (III-42 y 43) dan el estado de esfuerzos neutral y efectivos en un elemento de arcilla sujeto a presiones exteriores, haciéndose notar la utilidad que pueden tener en la distribución de esfuerzos efectivos y neutrales en un medio arcilloso.

El capítulo IV contiene una aplicación de la teoría al caso de las grietas en el lecho del antiguo lago de Texcoco. Las figuras 9 y 10 muestran las tensiones neutrales debidas al proceso de evaporación y las tensiones horizontales efectivas inducidas al depositarse una lámina de agua superficial. Las figuras 11 a 16 contienen fotografías que muestran diversos aspectos del agrietamiento.

El capítulo V contiene una discusión de las hipótesis consideradas en el análisis y de los puntos principales que requieren investigación. En la sección 3 de este capítulo se hace una distinción de las grietas de tensión de las comunmente conocidas como grietas por secado. En la sección 4 se anota la importancia que puede tener el efecto de pre-consolidación y su influencia en los valores del módulo de elasticidad y relación de Poisson de una arcilla saturada.

Los apéndices A y B contienen soluciones analíticas de los problemas considerados en las secciones 1 y 3 del capítulo III respectivamente y el apéndice C contiene una lista de la notación y definiciones usadas en los primeros 4 capítulos del trabajo.

APENDICE A

SOLUCION DEL PROBLEMA CON VALORES EN LA FRONTERA CORRESPONDIENTE A LA CONSOLIDACION UNIDIMENSIONAL EN UNA MASA SEMI-INFINITA DE ARCILLA SATURADA POR EFECTO DE EVAPORACION SUPERFICIAL.

Se obtendrá la solución de este problema por el método de la transformada de Laplace, denotando por $\bar{u}$ la transformada de u.

Multiplicando la ecuación (III-1) por e^{-pt} e integrando respecto a t de 0 a ∞ se obtiene

$$c_v \int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dt = \int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial u}{\partial t} dt \tag{A-1}$$

pero

$$\int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dt = \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_0^\infty u e^{-pt} dt = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \tag{A-2}$$

e, integrando por partes

$$\int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial u}{\partial t} dt = \left[u e^{-pt} \right]_0^\infty + p \int_0^\infty u e^{-pt} dt = p \bar{u} \tag{A-3}$$

ya que el término en paréntesis rectangular se anula para t=0 por la condición inicial (III-3) y para t= ∞ debido al factor exponencial.

Por lo tanto la ecuación (III-1) se reduce a

$$c_v \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} = p \bar{u} \tag{A-4}$$

Tratando la condición de frontera (III-2) en forma similar, se obtiene

$$\int_0^\infty e^{-pt} \frac{\partial u}{\partial z} dt = \frac{I_e \gamma_w}{k} \int_0^\infty e^{-pt} dt \quad , \quad z = 0 \tag{A-5}$$

es decir

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{I_e \gamma_w}{k} \frac{1}{p} \quad , \quad z = 0 \tag{A-6}$$

La solución de (A-4) que satisface (A-6) y para la que $\bar{u}$ permanece finita cuando z tiende a infinito es

$$\bar{u} = -\frac{I_e \gamma_w}{k} \frac{e^{-qz}}{pq} \tag{A-7}$$

donde

$$q^2 = \frac{p}{c_v}$$

De una tabla de transformadas (Ref. 10), se encuentra que la función antitransformada de la ecuación (A-7) es

$$u = -\frac{I_e \gamma_w}{k}\left[2\left(\frac{c_v t}{\pi}\right)^{1/2} e^{-\frac{z^2}{4c_v t}} - z \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{c_v t}}\right] \tag{A-8}$$

donde

$$\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z \tag{A-9}$$

y

$$\operatorname{erf} z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\eta^2} d\eta \tag{A-10}$$

Es fácil verificar que (A-8) satisface (III-1), (III-2) y (III-3) y que es, por lo tanto, la solución requerida del problema considerado.

APENDICE B

SOLUCION DEL PROBLEMA CORRESPONDIENTE A LA OBTENCION DE LOS ESFUERZOS GENERADOS POR FUERZAS EXTERIORES EN UNA MASA DE ARCILLA SATURADA NO CONFINADA HACIENDO USO DEL CALCULO TENSORIAL.

Consideremos que un elemento de arcilla saturada se sujeta bruscamente a los esfuerzos totales τ_{ij}. Representando por $\bar{\tau}_{ij}$ y por u los esfuerzos efectivos y neutral producidos por τ_{ij}, la relación entre los esfuerzos totales y los efectivos se puede escribir

$$\tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} + \delta_{ij}\, u \qquad \text{(B-1)}$$

donde δ_{ij} es la delta de Kronecker definida por

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 1 \quad si \quad i = j \\ \delta_{ij} &= 0 \quad si \quad i \neq j \end{aligned} \qquad \text{(B-2)}$$

Las deformaciones unitarias ε_{ij} debidas a los esfuerzos $\bar{\tau}_{ij}$ están dadas por la expresión (Ref. 11)

$$E\,\varepsilon_{ij} = (1+\mu)\,\bar{\tau}_{ij} - \mu\,\delta_{ij}\,\bar{\tau}_{KK} \qquad \text{(B-3)}$$

donde E y μ son el módulo de elasticidad y la relación de Poisson respectivamente, relativos a la estructura del material sólido de la arcilla.

La deformación volumétrica unitaria $\frac{\Delta V}{V}$ del elemento está dada por

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_{KK} \qquad \text{(B-4)}$$

Suponiendo que las partículas y el agua son incompresibles, al cambiar bruscamente los esfuerzos exteriores en una masa de arcilla totalmente saturada, los esfuerzos iniciales generados deberán ser los correspondientes a una deformación volumétrica nula para todo elemento de la masa de suelo.

Por consiguiente deberá cumplirse la ecuación

$$\varepsilon_{ii} = (1+\mu)\,\bar{\tau}_{ii} - \mu\,\delta_{ii}\,\bar{\tau}_{KK} = 0 \qquad \text{(B-5)}$$

lo que conduce a

$$(1-2\mu)\,\bar{\tau}_{ii} = 0 \qquad \text{(B-6)}$$

En el caso de materiales compresibles, se debe tener por lo tanto

$$\overline{\tau}_{ii} = \tau_{ii} - 3u = 0 \qquad \text{(B-7)}$$

de donde

$$u = \frac{\tau_{ii}}{3} \qquad \text{(B-8)}$$

$$\overline{\tau}_{ij} = \tau_{ij} - \frac{\tau_{ii}}{3} \qquad \text{(B-9)}$$

APENDICE C

NOTACION Y DEFINICIONES

Las dimensiones de las distintas cantidades en la lista siguiente aparecen en el sistema c.g.s. Cuando en el texto se usa otro sistema se anotan las unidades explícitamente. Sólo se incluyen los símbolos y definiciones usados en los capítulos I al IV.

SIMBOLO	NOMBRE	DIMENSIONES
C	Constante definida por (III-6)	$gr/_{cm^3}$
C_v	Coeficiente de consolidación	cm^2/seg
E	Módulo de elasticidad de la estructura sólida de la arcilla	$gr/_{cm^2}$
$e=2.7182...$	Base de logaritmos naturales (Cap.III)	Abstracto
e	Relación de vacíos (Cap.IV)	Abstracto
Ie	Intensidad de evaporación	$cm/_{seg}$
k	Coeficiente de permeabilidad	$cm/_{seg}$
K_o	Coeficiente de presión en reposo	Abstracto
p	Presión vertical total	$gr/_{cm^2}$
p_x, p_y, p_z	Presiones exteriores en la dirección de los ejes coordenados x, y, y z, respectivamente	gr/cm^2
t	Tiempo	seg
u	Exceso de presión hidrostática	$gr/_{cm^2}$
u_h	Presión hidrostática	$gr/_{cm^2}$
$-u_o$	Tensión máxima que puede desarrollarse en el agua intersticial sin que ésta pierda su continuidad	$gr/_{cm^2}$
$u_T = u + u_h$	Presión neutral	$gr/_{cm^2}$
x, y, z	Ejes coordenados horizontales y vertical respectivamente	cm
x	Parámetro adimensional definido por (III-8)	Abstracto
x_o	Raíz de la ecuación (III-11)	Abstracto

SIMBOLO	NOMBRE	DIMENSIONES
z_o	Profundidad del nivel freático	cm
γ_m	Peso específico de la arcilla saturada	$gr/_{cm}3$
γ'_m	Peso específico sumergido de la arcilla saturada	$gr/_{cm}3$
γ_w	Peso específico del agua	$gr/_{cm}3$
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	Deformaciones unitarias en la dirección de los ejes coordenados x,y, y z respectivamente	Abstracto
μ	Relación de Poisson de la estructura sólida de la arcilla	Abstracto
μ_c	Relación de Poisson de la estructura sólida de la arcilla durante el proceso de carga	Abstracto
μ_d	Relación de Poisson de la estructura sólida de la arcilla durante el proceso de descarga	Abstracto
$\pi = 3.1415...$	Relación de la circunferencia al diámetro en un círculo	Abstracto
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Esfuerzos normales totales en la dirección de los ejes coordenados x,y, y z respectivamente	$gr/_{cm}2$
$\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z$	Esfuerzos normales efectivos en la dirección de los ejes coordenados x,y, y z respectivamente	$gr/_{cm}2$
$\bar{\sigma}_{x1}, \bar{\sigma}_{y1}, \bar{\sigma}_{z1}$	Esfuerzos normales efectivos al final de un período de evaporación	$gr/_{cm}2$
$\bar{\sigma}_{x2}, \bar{\sigma}_{y2}, \bar{\sigma}_{z2}$	Esfuerzos normales efectivos inducidos al anular el exceso de presión hidrostática	$gr/_{cm}2$
$\bar{\sigma}_{x3}, \bar{\sigma}_{y3}, \bar{\sigma}_{z3}$	Esfuerzos normales efectivos producto de la superposición de los estados 1 y 2 anteriores	$gr/_{cm}2$

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo que se presenta como Tesis Doctoral es el resultado de estudios e investigaciones realizados durante varios años que comprenden: un año de estudios de maestría (septiembre de 1952 a junio de 1953) en la Universidad de Harvard como becario del Departamento de Estado de los Estados Unidos de Norte América, y un año de estudios doctorales (septiembre de 1953 a junio de 1954) en la misma universidad efectuado con una beca parcial de la propia universidad y a una complementaria otorgada durante dicho período por el Instituto Nacional de la Investigación Científica. Posteriormente el autor concibió e inició las investigaciones de este trabajo siendo investigador del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., para continuarlas y terminarlas al estar a cargo de la Oficina de Mecánica de Suelos, Departamento de Ingeniería de Suelos, de la Dirección General de Proyectos y Laboratorios de la S.O.P. y ser profesor de medio tiempo en la División del Doctorado de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M.

Agradecimiento especial merecen: el Dr. Arthur Casagrande, Profesor de Mecánica de Suelos y Cimentaciones en la Universidad de Harvard, por la instrucción básica recibida y su interés para efectuar en Harvard estudios doctorales; el Dr. Nabor Carrillo, Ex-Rector de la Universidad Nacional Autónoma de México, por su apoyo para salir al extranjero a realizar dichos estudios y por las orientaciones recibidas sobre este interesante tema; los Ings. Raúl J. Marsal y Marcos Mazari, investigadores del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., por sus comunicaciones personales sobre el agrietamiento en el valle de México; el Dr. F. E. Richart, Jr., Profesor de Ingeniería Civil en la Universidad de Florida, por sus comentarios y sugestiones sobre el artículo del autor presentado al Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones celebrado en México, D. F., en septiembre de 1959; el Dr. Leonardo Zeevaert, Ingeniero consultor y Profesor de Mecánica de Suelos y Cimentaciones en la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., por su crítica constructiva y sugestiones que condujeron a una revisión de la sección 2 del capítulo III de este trabajo y, por último, el Dr. Emilio Rosenblueth, Director del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M., por la revisión del manuscrito de esta tesis.

REFERENCIAS

1. Carrillo Nabor. Comunicación personal sobre sus conferencias en el Congreso Científico Mexicano, 3er. Centenario Universidad Nacional, México, D. F., 1951; en la Universidad de Harvard, Cambridge Mass., 1951 y en el Centenario de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (A.S.C.E.), Chicago Ill., 1952.

2. Zeevaert Leonardo. Estudio de Mecánica de Suelos y Recomendaciones para el Diseño y Construcción de la Cimentación de las Torres para la Línea de 85 K.V. Cerro Gordo-Los Reyes propiedad de la Compañía de Luz y Fuerza Motriz, S. A. México, D. F., julio 30 de 1951.

3. Hiriart Fernando, Marsal Raúl J., Cruishank Gerardo, Key Fernando. Contribución de la Comisión Federal de Electricidad a la Solución del Problema de Abastecimiento de Agua a la Ciudad de México. Noviembre de 1952. Pags. 12 a 13 y 23 a 26.

4. Marsal Raúl J. y Mazari Marcos. El Subsuelo de la Ciudad de México. Parte C. Comportamiento de las Cimentaciones. Instituto de Ingeniería. U.N.A.M. México, D. F., febrero de 1960. Pags. 459 a 461.

5. Terzaghi Karl. Erdbaumechanik. Viena, 1925.

6. Juárez Badillo Eulalio. Teoría de Grietas de Tensión. Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México, D. F., septiembre de 1959.

7. Marsal Raúl J. y Mazari Marcos. El Subsuelo de la Ciudad de México. Parte A. Estratigrafía y Propiedades. Instituto de Ingeniería. U.N.A.M. México, D. F., septiembre de 1959. Pags. 241 a 308.

8. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. Boletín Hidrológico N°. 1. Recopilación de datos mensuales del valle de México. Pags. 81 a 87.

9. Terzaghi Karl. Theoretical Soil Mechanics. London: Chapman and Hall, Limited; John Wiley and Sons, Inc. New York; 1951. Art. 112. Pags. 305 a 308.

10. Crank J. "The Mathematics of Diffusion". Oxford at the Clarendon Press. 1956. Pag. 327.

11. Sokolnikoff I. S. Mathematical Theory of Elasticity. Mc Graw-Hill Book Company, Inc. 1946. Pag. 70.