

Aplicación de la Mecánica de los Suelos al Estudio de las Excavaciones en Arcillas Saturadas

CONFERENCIA SUSTENTADA POR EL INGENIERO

LEONARDO ZEEVAERT, S. M. I. C. DEL DPTO. DE

PROYECTOS DE LA C. N. I. EN LA ASOCIACION DE INGENIEROS Y ARQUITECTOS DE MEXICO

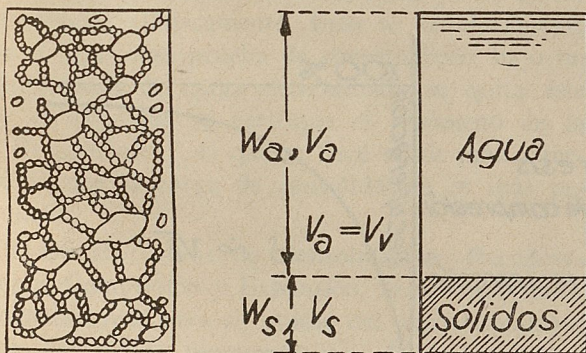
DOS de las pruebas más importantes en la Mecánica de los Suelos, son la prueba de Consolidación y Recuperación, y la prueba de Compresión Triaxial.

Trataré primero brevemente la parte del laboratorio relacionada con estas pruebas, con el objeto de obtener una comprensión clara de los fenómenos envueltos en ellas y así entender las ideas que a continuación expongo para el análisis de la estabilidad de las excavaciones en los suelos arcillosos saturados.

Como es bien sabido, en general todos los suelos arcillosos están constituidos de una estructura cavernosa, debido a que casi todos estos suelos han sido el producto de la decantación de materiales finísimos que se encuentran en suspensión en el agua. Así habrá que considerar al suelo formado por una estructura reticular, hecha de cupulitas, columnitas, etc., y en donde los vacíos dejados por estos elementos están llenos de agua. (Fig. 1.) El agua atrapada dentro

de los vacíos del material necesitará forzosamente una carga hidrostática para poder ser expulsada al exterior; es evidente entonces que la cantidad de agua que salga será proporcional a la carga hidrostática en los vacíos y al área expuesta, ya que el flujo en el interior del material al forzar el agua hacia el exterior es tan lento que puede considerarse como laminar y que obedece a la Ley de Darcy.

FIG. 1



Relación de vacíos $e = \frac{V_v}{V_s}$

Contenido de agua $w = \frac{W_a}{W_s}$

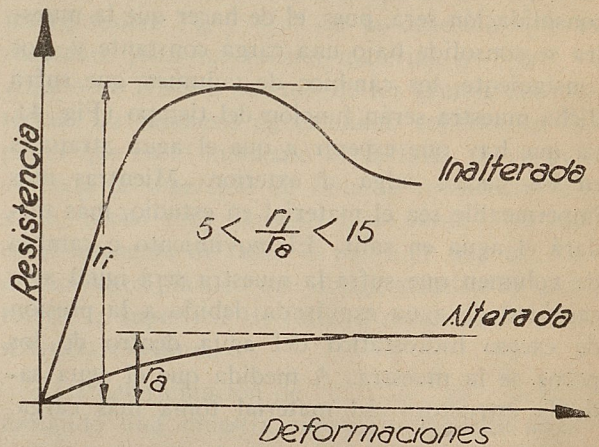


FIG. N° 2

PRUEBAS DE CONSOLIDACION Y RECUPERACION

La prueba de consolidación consiste: en tomar una muestra representativa del material en cuestión, la que deberá ser "inalterada". Por inalterada se entiende que se obtenga tal como está en el seno de la masa de donde se extrajo, pues si está alterada, en ella se habrá roto su estructura y si esta estructura se rompe, el material perderá su capacidad resistente (Fig. 2), llegando a bajar la resistencia del material inalterado notablemente. Habiendo logrado la ex-



FIG. N° 3

tracción de una muestra inalterada, se labra de ésta una pastilla la cual se somete a incrementos de carga, la pastilla (Fig. 3) queda entre dos piedras porosas con el objeto de dejar que el agua atrapada dentro de los vacíos de la estructura pueda salir libremente. El fenómeno de consolidación será, pues, el de hacer que la muestra se consolide bajo una carga constante y, por consiguiente, los cambios de volumen que sufra dicha muestra serán función del tiempo (Fig. 4), ya que hay que esperar a que el agua atrapada en los vacíos salga al exterior. Mientras más impermeable sea el material en estudio, más tardará el agua en salir. El movimiento o cambio de volumen que sufre la muestra será igual a la cantidad de agua expulsada debido a la presión de exceso hidrostático del agua dentro de los poros de la muestra. A medida que el agua sale, la estructura del material toma más carga.

Cuando la estructura toma la carga íntegra, el flujo del agua cesa y el material se dice que está consolidado bajo esa carga. Por lo tanto, un material muy rígido puede estar en el proceso de consolidación y se dice que no está consolidado; en cambio, otro de estructura mucho más débil puede estar consolidado, y se dice que está consolidado bajo una carga dada porque no sufre más movimientos con el transcurso del tiempo. La figura 4 muestra la curva de consolidación. Si se procede a hacer una serie de pruebas de consolidación y siempre aumentando la carga, se obtendrá para cada prueba un juego de valores; una disminución en el volumen, que es proporcional al cambio de relación de vacíos, y una presión.

Con estos valores se puede formar la gráfica (Fig. 5), la cual se llama "Curva de Compresión". Esta curva ya no es función del tiempo y nos expresa la rapidez de variación de la relación de vacíos de un material consolidado con la presión.

Si en el proceso de carga de la curva A-B (Fig. 5), en lugar de continuar aumentando carga la disminuimos por incrementos, obtendremos una serie de curvas para cada incremento, dichas curvas muestran la rapidez de variación de los aumentos de volumen con el tiempo. En la primera fase del fenómeno los volúmenes son aproximadamente proporcionales a la raíz cuadrada de los tiempos.

A cada una de estas curvas la llamaré de "recuperación". (Fig. 6.) El fenómeno del esponjamiento o recuperación del material al aliviarlo de una carga bajo la cual ha estado consolidado o parcialmente consolidado, es aproxi-

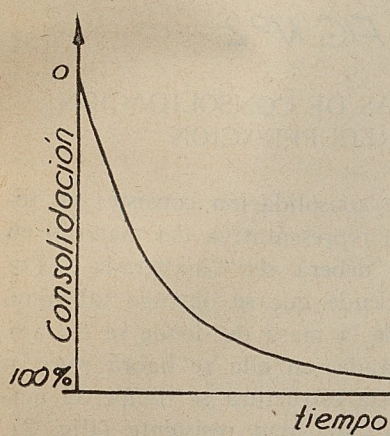


FIG. 4

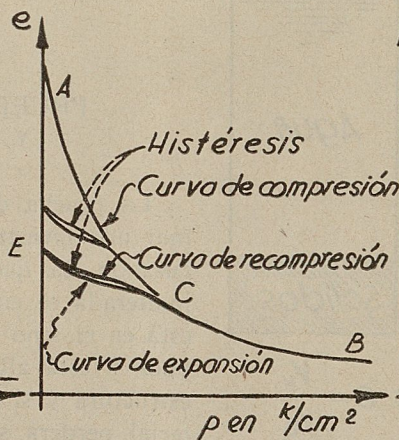


FIG. 5

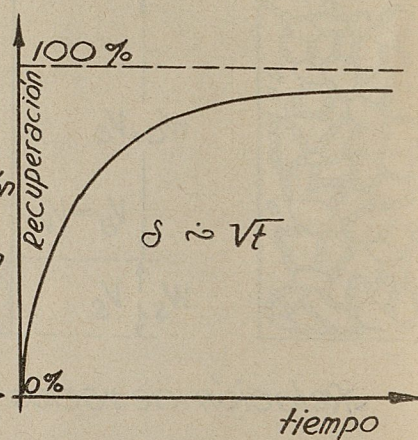


FIG. 6

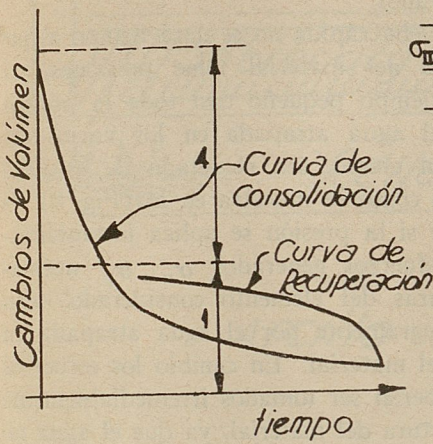


FIG. 7

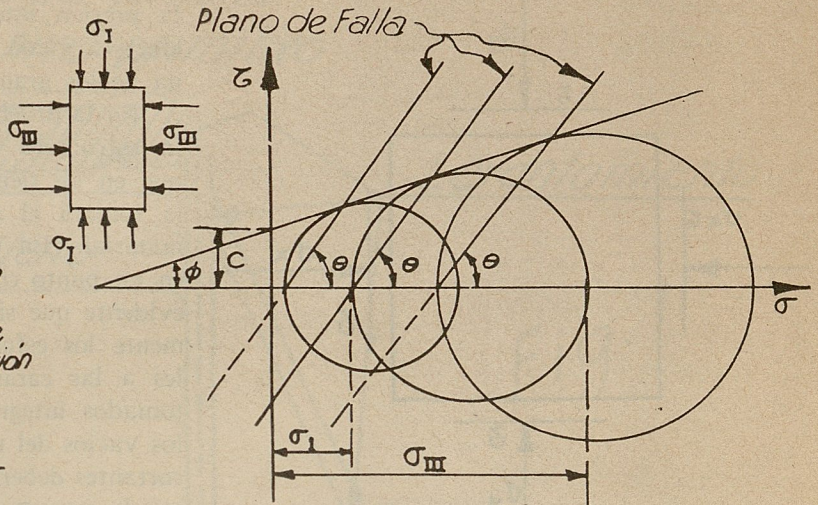


FIG. 8

madamente igual al fenómeno inverso de la consolidación, ya que al aliviarlo de cierta carga se genera una fuerza interior, debido a la elasticidad de la estructura que no ha sido rota todavía durante el proceso de consolidación. La figura 7 da una idea cuantitativa de la relación que hay entre una curva de "Consolidación" y otra de "Recuperación", de una arcilla saturada del subsuelo de la ciudad de México.

Con los datos de las curvas de "Recuperación", para cada carga, podremos trazar (Fig. 5) una curva C-E que ya no es función del tiempo y que se llama curva de expansión. El punto E nunca coincidirá con el punto A, ya que durante los procesos de consolidación para formar la curva A-B, se ha destruido parte de la estructura del material; dicha parte ya no puede reaccionar elásticamente. Esto se ve claramente si al hacer una prueba de consolidación bajo un incremento de carga determinado se quita éste y se deja que se verifique el fenómeno de la "Recuperación", el que se hace sentir más a medida que la carga de consolidación es más pequeña.

De las curvas de Consolidación, Recuperación, Compresión y Expansión, se obtienen datos cuantitativos para el estudio del comportamiento de los suelos representativos de las muestras que se han analizado en el laboratorio.

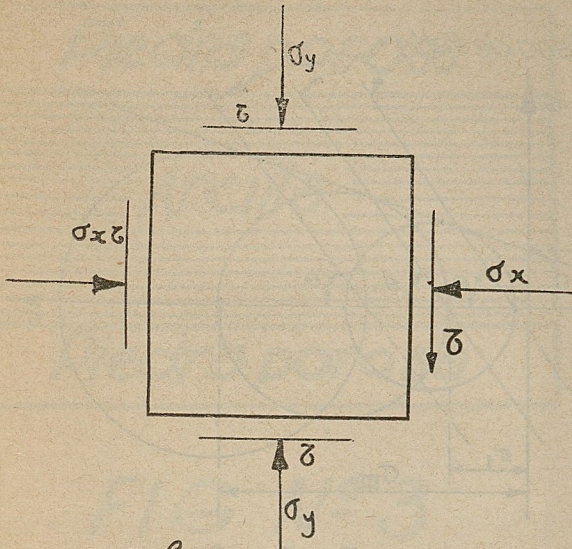
PRUEBAS DE COMPRESION TRIAXIAL

Las pruebas de compresión triaxial consisten en la determinación de la resistencia del ma-

terial según la Ley empírica de Coulomb y que matemáticamente se puede expresar como sigue: $r = c + \sigma \tan \Phi$, en donde "r" es la resistencia máxima del material para un esfuerzo intergranular " σ ", "c" es la cohesión que es constante para un mismo material, y " Φ " el ángulo de fricción interna de los granos del material. La hipótesis de Coulomb consiste en suponer que en el momento de la falla, se verifica en toda la superficie de falla la resistencia máxima, hecho muy cercano a la verdad, ya que en el momento de fallar el material hay un acomodamiento plástico que obliga a todos los puntos de la superficie de falla, a desarrollar su resistencia máxima.

La determinación de "c" y de " Φ ", se hace tomando una muestra representativa del material en cuestión, de la cual se hace un cilindro (Fig. 9), que se somete a esfuerzos principales. Los axiales se dan por medio de un dispositivo de carga y los normales por medio de una presión hidrostática para permitir libremente la deformación de la probeta. Luego, haciendo varias experiencias con diferentes presiones laterales se obtendrán círculos de Mohr, cuya envolvente nos representa la resistencia del material.

La falla de que hablo es una falla rápida, si se compara con el efecto de Consolidación y Recuperación de que hablé en el párrafo anterior, como tal, siempre se ha considerado sin incluir en su estudio el factor tiempo, ya sea que se use la prueba lenta o rápida. La prueba lenta no me interesa en el presente asunto que me ocu-



*Esfuerzos en un punto
Fig. 9*

pa, ya que ésta consistiría en dejar consolidar el cilindro bajo incrementos de carga axial y al final ver qué carga produce la ruptura.

La falla rápida es la que me interesa, ya que es la que se verifica en los materiales arcillosos saturados, pues el fenómeno de consolidación en un estrato en la naturaleza es muy retardado.

Además, a medida que el material se consolida, la presión intergranular se hace cada vez más efectiva y con ella el término por fricción interna de los granos.

En la prueba rápida no se dará tiempo a que la estructura del material tome presiones, ya que en un tiempo pequeño casi toda la presión la tomará el agua atrapada en los vacíos del material. En efecto, sea el estado de esfuerzo en un punto como se muestra en la (Fig. 9), es evidente que si la presión se aplica instantáneamente los esfuerzos generados σ_x, σ_y normales a las caras del elemento considerado, sean tomados íntegramente por el agua atrapada en los vacíos del material. En cambio los esfuerzos cortantes deberán ser tomados irremediamente por la estructura del material, ya que el agua no es capaz de contrarrestarlos.

La falla se hace independientemente de la presión intergranular y será función de la energía interna del material y del estado de esfuerzo y relación de vacíos del material en el momento de la prueba.

Luego, si la presión intergranular " σ " es pequeña el término $\sigma \tan \Phi$ también lo será. La figura 10 muestra cómo quedarían los círculos de Mohr para una prueba rápida en un material arcilloso saturado.

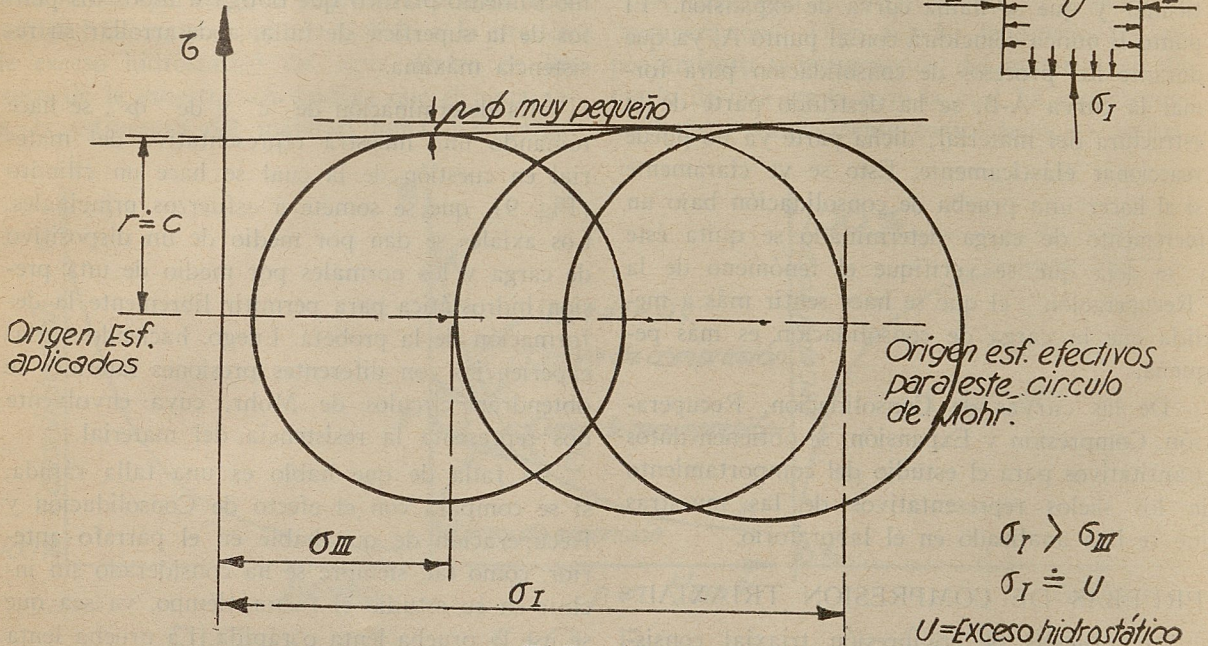
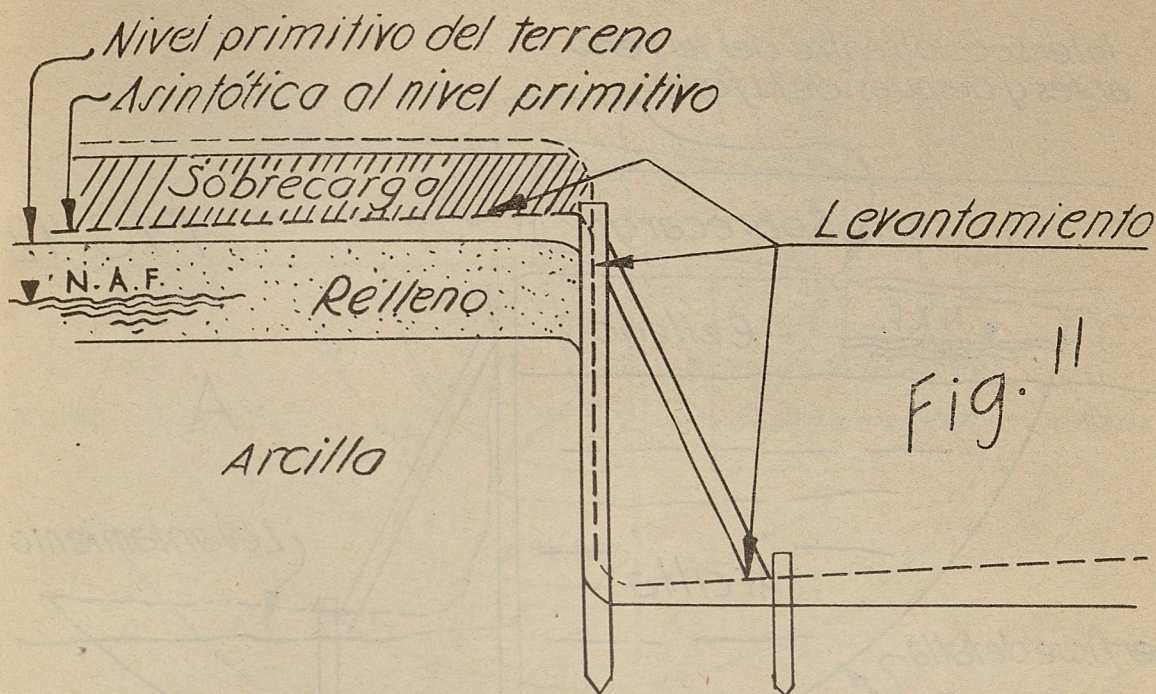


FIG. 10



APLICACION DE LOS ESTUDIOS DE LABORATORIO

Para aplicar los resultados de laboratorio al estudio de la estabilidad de las excavaciones, clasificaré primero los dos fenómenos que pueden ocurrir al hacer una excavación en un suelo arcilloso y que son como sigue:

a). El estrato de arcilla en cuestión sufre recuperación o esponjamiento debido al alivio de la carga.

b). El estrato de arcilla falla plásticamente al venir el desequilibrio motivado por el alivio de carga.

Caso a.—Al aligerar el terreno de las cargas que tenía y bajo las cuales estaba o está siendo consolidado, éste sufre el fenómeno del esponjamiento, es decir, el terreno (Fig. 11), succiona lentamente el agua; al generarse en su interior la fuerza motivada por la parte elástica o estructura no rota del material, el movimiento se hará lentamente succionando el agua hasta que la fuerza de "Recuperación" pase a ser nula, que será cuando la parte todavía elástica se haya recuperado íntegramente.

Es evidente que este efecto, al igual que el de consolidación, será asintótico, es decir, el final del proceso se verifica en un tiempo muy grande. Por consiguiente, es de esperarse, como indican las pruebas de laboratorio, que si durante el proceso de consolidación se rompió parte de la estructura del material, durante la "Recupera-

ción" no se recuperará íntegramente lo que se ha consolidado. Luego los hundimientos por "Consolidación" de una carga serán de orden mucho mayor que los abultamientos por "Recuperación"; además, el esponjamiento se verificará lentamente y aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo.

Para dar una idea cuantitativa de este fenómeno, por ejemplo para ciertos lugares del subsuelo arcilloso de la ciudad de México, puedo decir que una construcción que haya consolidado 40 centímetros el terreno, en muchos años, la recuperación de éste al demoler la construcción, será aproximadamente de 10 centímetros, también en un tiempo muy largo.

El fenómeno en el campo se verifica levantándose el terreno, con un máximo hacia el centro de la excavación, ya que en este lugar y dentro de la masa de arcilla se produce el mayor alivio de esfuerzo debido al aligeramiento producido al quitar la carga.

Además, el nivel del terreno del levantamiento, para este caso, no cortará al nivel primitivo del terreno antes de la excavación o aligeramiento de éste, es decir, el nivel posterior será asintótico al nivel primitivo. Esta será la forma de verificar si el fenómeno producido cuando los bordes de la excavación se han levantado es el de "Recuperación". (Véase Fig. 11.)

Caso b.—Este caso consiste en localizar la superficie de falla que se registra al quitar la porción "A" Fig. 12 y que se origina debido al des-

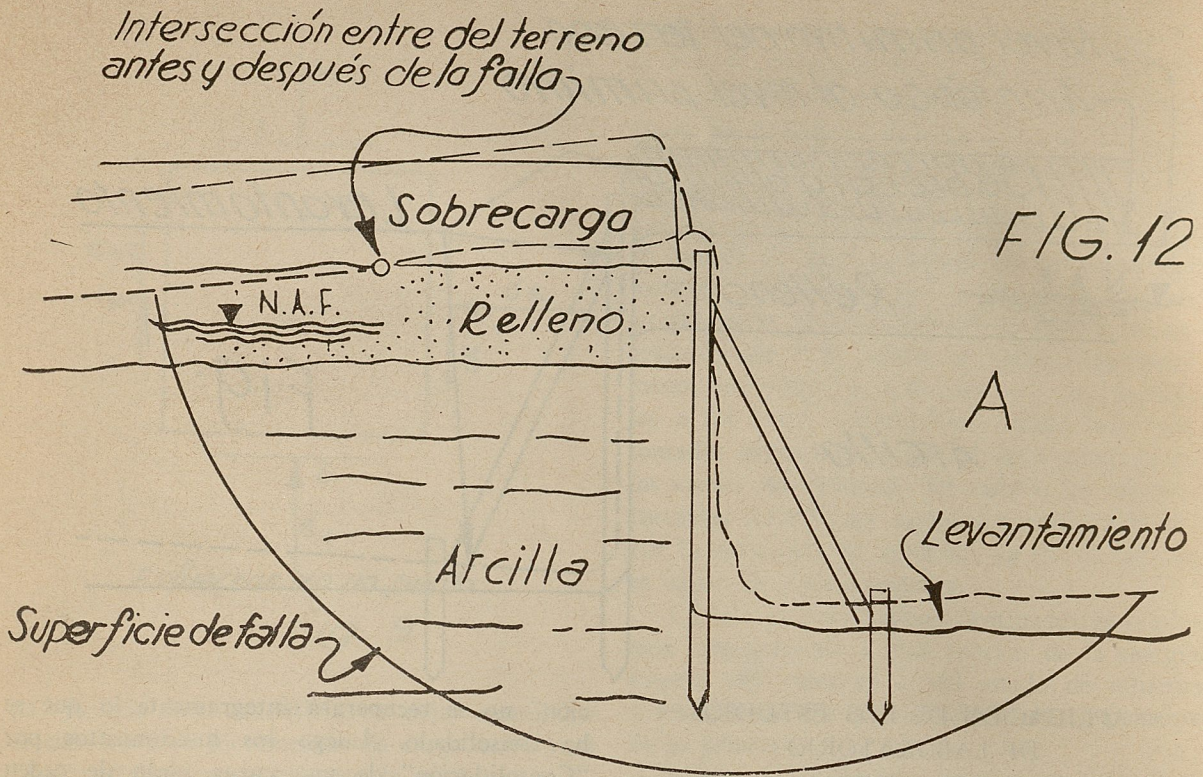
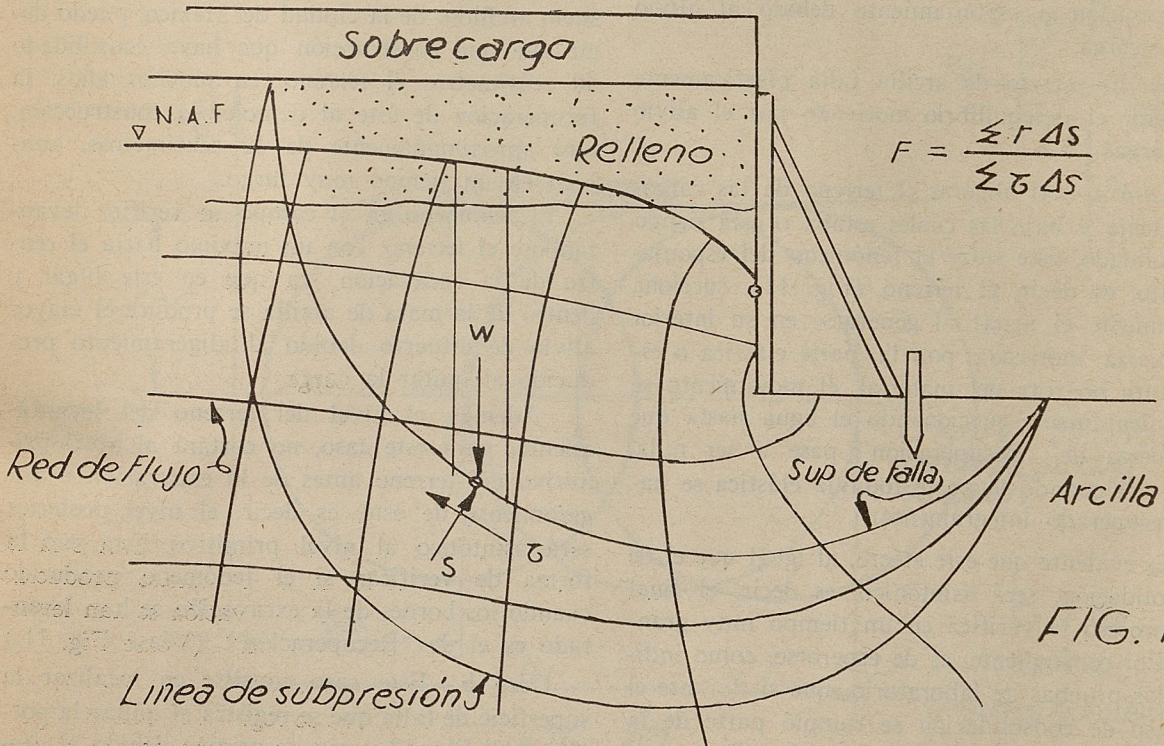


FIG. 12

equilibrio de fuerzas en la masa del terreno; esto motiva a que el material si no es suficientemente resistente falle plásticamente, siguiendo una superficie cilíndrica. Esta falla es instantánea y puede ocurrir de un día para otro re-

gistrándose levantamientos del fondo y de los bordes de la excavación. Es evidente que la excavación se levantará lo indispensable para equilibrar las fuerzas desequilibradas. Si se excava lo que el material se ha levantado, el fenó-



$$F = \frac{\sum r \Delta s}{\sum \tau \Delta s}$$

FIG. 13

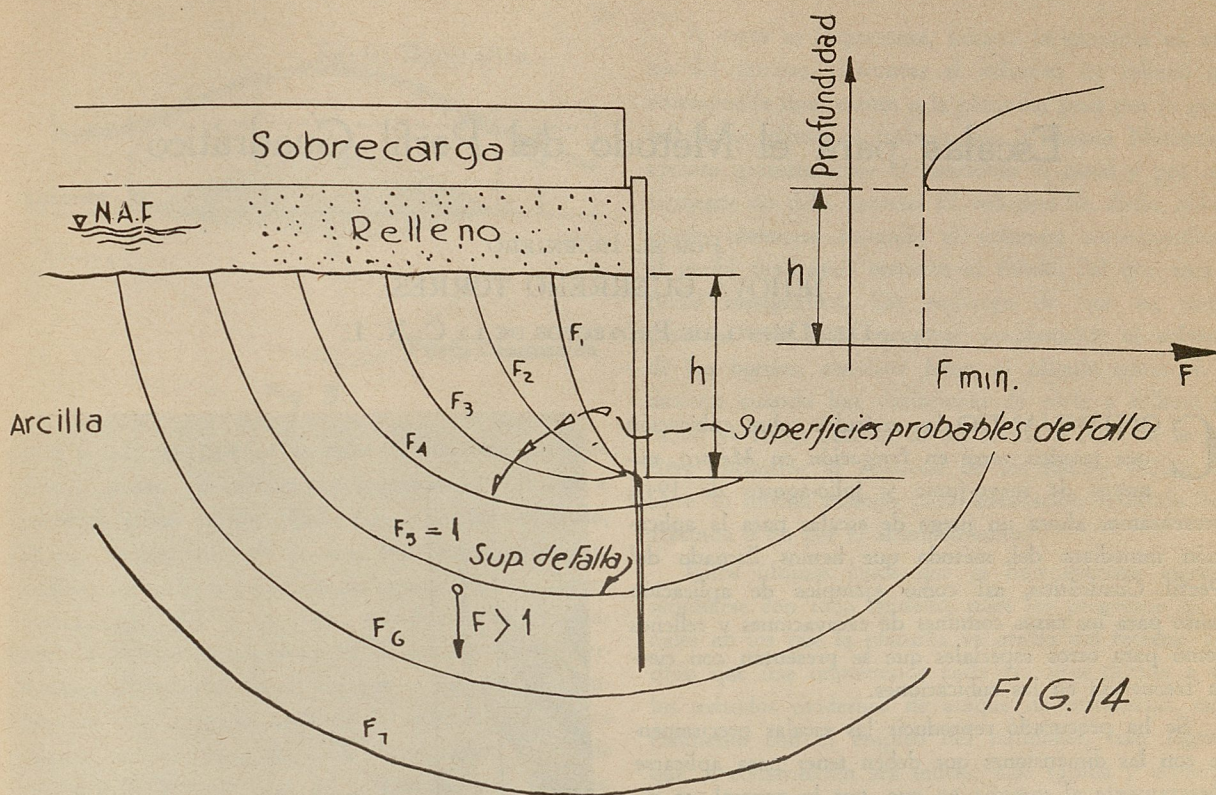


FIG. 14

meno se repetirá en corto tiempo empeorándose cada vez más, ya que la estructura del suelo se romperá parcialmente al producirse la falla plástica, lo que hace que la resistencia del material baje notablemente.

La única forma de evitar este fenómeno es el de estudiar la profundidad de la superficie de falla, para atravesarla por medio de una ataguía lo suficientemente resistente para impedir el flujo plástico.

Habrá que estudiar, pues, el factor de seguridad $F = \frac{\sum c \Delta s}{\sum \tau \Delta s}$ para diferentes círculos probables de falla. Aquí $\sum c \Delta s$, es la resistencia que puede dar el material en la superficie de falla, y $\sum \tau \Delta s$ es la fuerza cortante en esta superficie. Las fuerzas que intervienen (Fig. 13), son a saber:

$S =$ Subpresión obtenida del flujo hidrodinámico del agua dentro de la masa.

$W =$ Peso saturado del material dentro de la superficie de falla, incluyendo el peso de las sobrecargas, etc.

$\tau =$ Esfuerzo cortante unitario existente componente de "W" y "S".

$r =$ Resistencia máxima del material en la superficie de falla.

En esa forma se obtiene una familia de superficies probables de falla (Fig. 14); generalmente se encuentra una de carácter local y es la falla del corte de la excavación la que nos dará un factor de seguridad mínimo; ésta se puede evitar con un muro de sostenimiento o contraventeo apropiado, ya que se puede considerar de carácter local, pero no así las fallas de las superficies que siguen a ésta, las cuales únicamente se evitarán formando una tabla-estacado o ataguía que corte la superficie de falla de factor de seguridad $F=1$, y calculando el tabla-estacado y su empotramiento en las superficies de $F > 1$, con las fuerzas que obran a uno y otro lado de él. En la figura 14, se muestra cómo varía el factor de seguridad con la profundidad. La forma de comprobar que se ha verificado esta falla es viendo si el nivel de la superficie del terreno después de la falla, corta al nivel primitivo del terreno antes de que éste fuese aliviado de carga.

Son mis intenciones que estas ideas sirvan de utilidad y estímulo a las personas interesadas en el estudio de la Mecánica de los Suelos. Además, el de abrir nuevos horizontes que tienen la misma importancia que el estudio de las excavaciones tiene en las arcillas saturadas del Valle de México.