

Breve reseña sobre el estado actual del estudio de terrenos de fundación (*)

El propósito de este artículo es examinar y comentar brevemente los métodos empleados actualmente en un estudio racional de terrenos de fundación.

Introducción.—Debido a la gravitación toda estructura debe recurrir en última instancia al suelo para que la soporte. Ya que el comportamiento del terreno de fundación afecta la estabilidad de la estructura, el terreno es un elemento estructural. Para declarar que una estructura es segura, es necesario entonces investigar el terreno de fundación.

En un terreno de fundación intervienen principalmente dos materiales: la sobrecarga o relleno (overburden) y la roca fundamental (bedrock). La sobrecarga está formada por sedimentos sin consolidar o sólo parcialmente consolidados. Estos sedimentos se deben a la acumulación de los fragmentos producidos por la desintegración mecánica o química de las rocas. La roca fundamental puede ser cualquier roca consolidada, sedimentaria, ígnea o metamórfica.

La sobrecarga puede estar o no presente. La roca fundamental está siempre presente, aunque frecuentemente a gran profundidad. En la fig. 1 se han representado esquemáticamente las relaciones posibles entre estos dos elementos en la zona de fundación.

El efecto de una estructura en el terreno depende primordialmente de la superficie ocupada por la fundación y el peso aplicado en ella. Un análisis ligero puede indicar que el comportamiento del terreno dependería sólo de las fatigas en la superficie. Se puede demostrar que las fatigas en la superficie son insuficientes para definir el comportamiento del terreno, siendo necesario además conocer la superficie ocupada por la fundación y la forma de esta superficie. Esto se puede demostrar refiriéndonos a las figuras 2 y 3. En la figura 2 se han trazado las líneas de igual fatiga vertical para el caso de carga uniforme sobre un área cuadrada. Por ejemplo, la fatiga tiene un valor del 20% del valor en la superficie hasta una profundidad máxima de 1,5 veces el ancho de la superficie cuadrada. Las superficies definidas por estas isobáricas han sido llamadas bulbos de presión por Terzaghi. Analizando esta figura se puede concluir que la penetración de una sobrecarga superficial depende del tamaño del área cargada. Esta conclusión está claramente expresada por la fig. 3 indicada por Kögler (1). En esta figura las curvas indican la fatiga máxima p a la profundidad z expresada como fracción de la fatiga p_0 , en función del tamaño del área cargada. El tamaño del área cargada se ha definido en esta figura, para el caso de base cuadrada, por la relación del ancho b del cuadrado

(*) Adaptado de un trabajo preparado por el autor en el California Institute of Technology.

con la profundidad z , y análogamente para el caso de una faja cargada (de 2 dimensiones).

Para poder declarar que un terreno de fundación es seguro y adecuado se deben estudiar los siguientes problemas:

- 1) Determinación de las fatigas dentro del suelo debido al agua que se infiltre (caso de un embalse) y debido al peso de la estructura.
- 2) Estudiar la estabilidad.
- 3) Determinación de los sentamientos.
- 4) Determinación de la cantidad del agua que escapa por filtración (caso de un embalse).
- 5) «Piping».

En este análisis nos hemos limitado a los factores que tienen relación con la seguridad o éxito puramente estructural de la fundación, sin discutir problemas de costo por ejemplo.

Para poder resolver racionalmente los problemas enumerados, es necesario contar con la siguiente información:

- 1) Fatigas aplicadas en la superficie de la fundación.
- 2) Propiedades mecánicas y físicas del relleno o sobrecarga (overburden).
- 3) Profundidad de la roca fundamental.
- 4) Calidad de la roca fundamental.
- 5) Condiciones geológicas en la roca fundamental.

En el estudio de un terreno de fundación intervienen las siguientes técnicas o disciplinas: Ensayo de suelos, Teorías de la mecánica de suelos, Estudios de percolación, Ensayos de rocas consolidadas, Levantamiento geológico, Levantamiento geofísico, Perforación, Construcción de galerías y piques.

Examinaremos ahora más en detalle los problemas enumerados anteriormente.

FATIGAS EN EL INTERIOR DEL SUELO

Para verificar la estabilidad de una fundación en suelos y también para poder determinar los sentamientos es necesario conocer las fatigas inducidas dentro del terreno por las cargas superficiales. Asumimos conocidas las fatigas aplicadas en la superficie.

La solución correcta de este problema supone el conocimiento de las propiedades físicas de los suelos.

Un procedimiento empleado actualmente para la determinación de estas fatigas está basado en la teoría de la elasticidad. El problema fundamental en este caso es la determinación de las fatigas dentro de un cuerpo semi-infinito, homogéneo, isotrópico y elástico, debido a una carga concentrada en la superficie. Integrando las fatigas producidas por una carga simple es posible obtener las fatigas debido a una distribución cualquiera de cargas en la superficie. Este problema fundamental fué resuelto por Boussinesq (1885).

Bastante trabajo de experimentación indica que hay una concordancia satisfactoria entre las fatigas calculadas con la teoría de la elasticidad y aquellas medidas experimentalmente en suelos, siempre que se excluya de la comparación las zonas muy próximas a las fundaciones. Steiner (1879), Strohschneider (1912) Bastian (1912), J. A. Moyer (1913), Enger (1916), Goldbeck (1917), Hugi (1927) y Kögler (1927) han efectuado experimentos a este respecto. Estos experimentos han sido discutidos por Fröhlich (3). Kögler (1) ha efectuado una excelente discu-

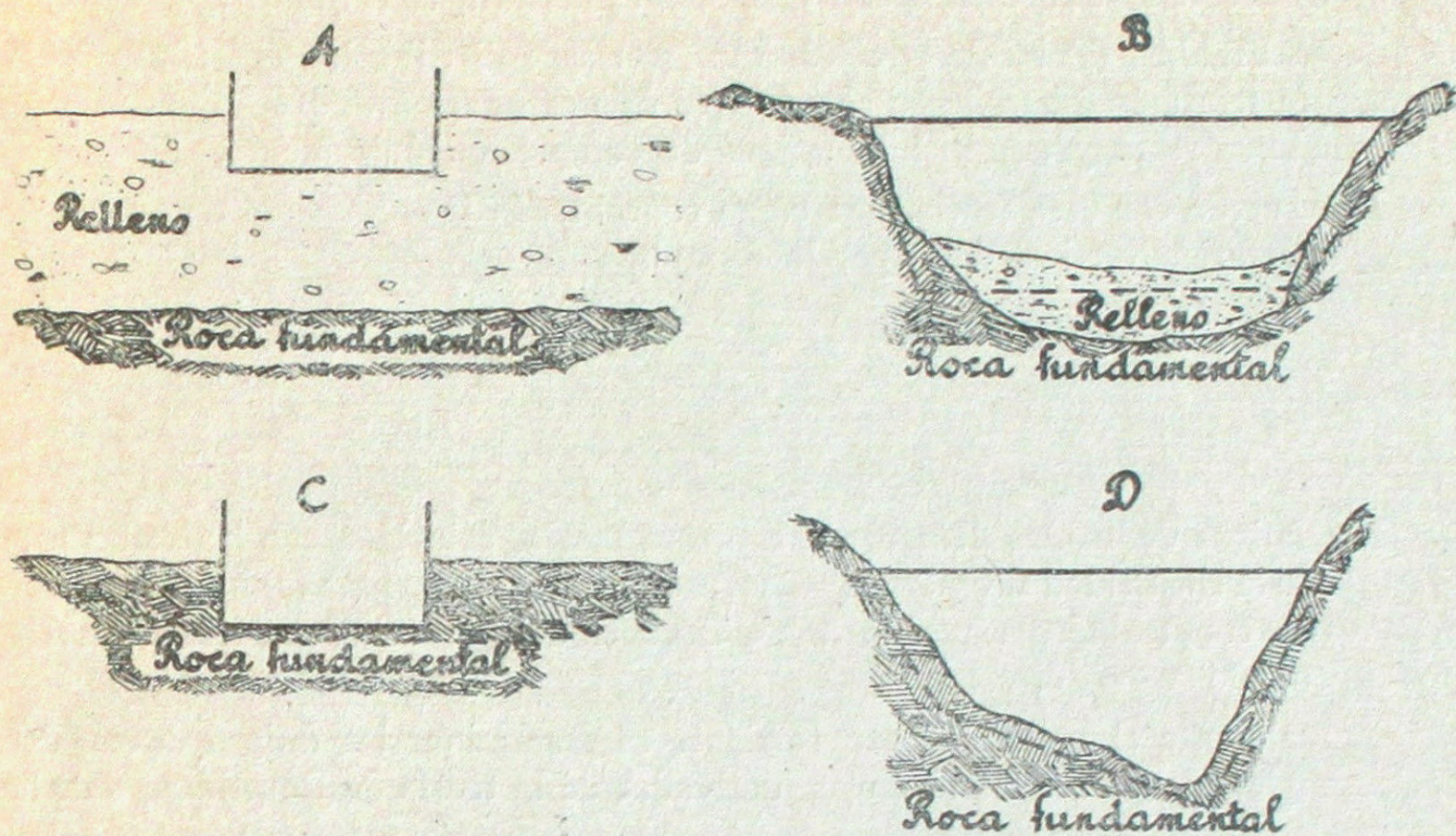


Fig. 1.- Representación esquemática de posibles relaciones entre relleno y roca fundamental.

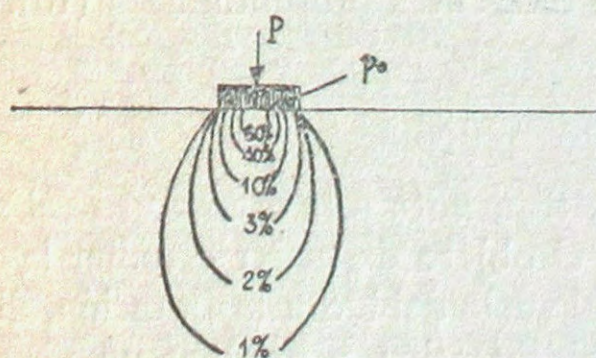


Fig. 2.- Bulbas de presión

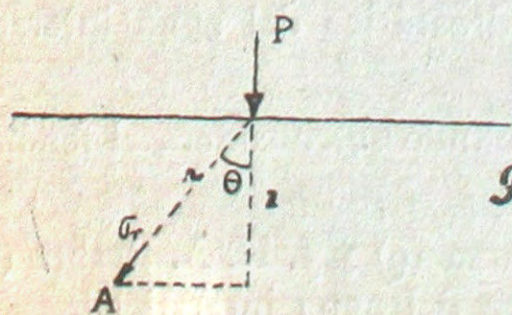
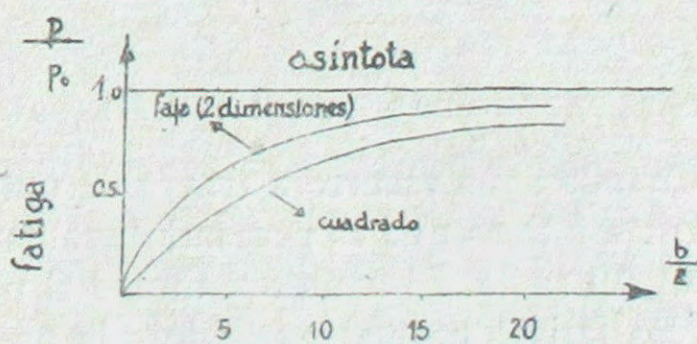


Fig. 4



Tamaño área cargada

Fig. 3.- Fatiga vertical p a profundidad z , debido a una carga p_0 en la superficie.

(Tomada de F. Kögler)

sión del problema de distribución de fatigas en los suelos. En todos los experimentos mencionados, se han comparado únicamente las fatigas verticales.

O. K. Fröhlich (3) ha desarrollado otra teoría de distribución de fatigas en el suelo. Esta teoría está basada en el principio de propagación de las fatigas principales en línea recta y admitiendo fatigas de compresión únicamente.

De acuerdo con esta teoría, una carga concentrada P produce en un punto A , fig. 4, una fatiga vertical dada por la fórmula

$$\delta_r = \frac{vP}{2\pi r^2} \cos^{v-2} \theta$$

donde v es el llamado factor de concentración.

Las fatigas deducidas de acuerdo con esta teoría, coinciden con las dadas por la teoría de la elasticidad si $v=3$ y $m=2$ respectivamente. Krynine (2) ha comparado esta teoría con trabajos experimentales, deduciendo que coinciden satisfactoriamente cuando $v = 6$.

Actualmente el procedimiento corriente es determinar las fatigas dentro del suelo, empleando ya sea las fórmulas derivadas de la teoría de Boussinesq o de la teoría de Fröhlich.

H. Gray (4) ha efectuado una recopilación muy útil de formulas, basadas en la teoría de la elasticidad, correspondientes a las cargas más corrientes.

Aunque hay una concordancia satisfactoria entre teoría y experimento, el problema de la distribución de fatigas en los suelos no puede considerarse resuelto. Los suelos reales difieren mucho de los sólidos elásticos. No se ha justificado la superposición de fatigas debido a una combinación de cargas. Se ha asumido que los sentamientos se deben exclusivamente a la fatiga vertical como si fuera fatiga principal, lo que no es cierto. La teoría de la elasticidad requiere que el material pueda soportar fatigas de tensión. Se sabe que esta suposición es inadecuada en el caso de los suelos. Sin embargo, las teorías que se usan actualmente parecen adecuadas para aplicaciones prácticas (12), indicando el orden de magnitud y la distribución de las fatigas verticales en el suelo a diferentes profundidades (10).

FATIGAS PRODUCIDAS POR LA INFILTRACIÓN DE AGUA

Cuando agua escurre a través de un suelo, transmite a la estructura del suelo diferentes fatigas que es necesario avaluar con el objeto de poder estudiar la estabilidad del suelo. El agua disminuye el peso del suelo debido a la flotación, disminuye las fatigas normales debido a la presión hidrostática, y produce un efecto de arrastre debido a las resistencias friccionales opuestas al escurrimiento.

Puesto que los suelos fallan por cizalle o deslizamiento interno, la fricción es un elemento importante para la estabilidad de un suelo. La fricción depende de las fatigas normales, de modo que cualquier disminución de las fatigas normales perjudica la estabilidad del suelo. La presión hidrostática del agua intersticial tiene este efecto.

El flotamiento y el arrastre son importantes cuando se considera el fenómeno de «piping», discutido más adelante.

En artículos de N. N. Pavlovski (5), L. F. Harza (6) y J. H. A. Brahtz (7) se discuten las fatigas producidas por el escurrimiento del agua intersticial.

SENTAMIENTOS

Cuando la fundación comprende suelos, es necesario a menudo determinar los sentamientos producidos por la carga adicional de las estructuras. Este problema es especialmente importante cuando se trata de estructuras indeterminadas, tales como tranques de albañilería y de arco, edificios de concreto armado, etc.

La determinación de los sentamientos requiere una determinación previa de las fatigas dentro del suelo. Ya hemos discutido este problema.

Muestras representativas de los suelos que se encuentran en la fundación deben ser ensayadas en el laboratorio, especialmente en el ensayo de consolidación. Con los resultados de estos ensayos y las fatigas calculadas es posible predecir los sentamientos.

Refiriéndonos a la fig. 2, vemos que la penetración efectiva de las fatigas aumenta con el ancho de la fundación, de modo que la investigación (muestreo y ensayo) debe extenderse a mayor profundidad mientras más ancha sea la fundación.

Las deformaciones de un suelo sometido a un cierto estado de fatigas son de 2 tipos (10): cambios de volumen debidos a las fatigas normales o consolidación y cambios de forma debido a cizalle.

La consolidación es un fenómeno gradual, que requiere tiempos más largos mientras el suelo sea menos permeable. La deformación por cizalle tiene lugar casi instantaneamente.

La teoría de la consolidación fué desarrollada por Terzaghi (11) suponiendo drenaje vertical y constreñimiento lateral. El fenómeno de la consolidación consiste principalmente en el escape del agua intersticial.

Las deformaciones debidas al cizalle están relacionadas con los desplazamientos laterales (horizontales) dentro del suelo. En los cuerpos elásticos estos desplazamientos laterales dependen del módulo de Poisson. Todavía no se ha desarrollado un método para determinar las deformaciones por cizalle en los suelos.

Para predecir los sentamientos debidos a la consolidación se efectúan ensayos de consolidación. En estos ensayos las muestras están lateralmente cohibidas y sometidas a una compresión uniaxial igual a la fatiga calculada en el interior del terreno.

La relación entre las dos clases de sentamientos depende de las propiedades físicas de los suelos, especialmente de su permeabilidad y estructura.

En arena los sentamientos debidos a cizalle son mucho más importantes que los debidos a consolidación; en consecuencia, los cálculos teóricos de los sentamientos que sólo pueden considerar la consolidación, dan malos resultados en el caso de arenas.

En el caso de arcillas se ha encontrado que dá resultados satisfactorios en la predicción de los sentamientos la aplicación de la teoría de la elasticidad para calcular las fatigas y la teoría de la consolidación para determinar los sentamientos.

El «score» en la predicción de sentamientos representado por la relación entre los sentamientos observados y los calculados, se ha encontrado que es como sigue (12 y 13):

Limo $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{3}$.

Arcillas caté

Resistentes (stiff brown clays) $\frac{1}{2}$

Arcillas negras 1

Juzgando por estas cifras se puede concluir que los métodos actuales permiten la predicción de los sentamientos sólo cuando se deben principalmente a la compresión de capas homogéneas de arcilla.

Se debe observar que para el caso de arcillas el valor absoluto de los sentamientos probablemente es mayor que para las otras clases de suelos. Así, afortunadamente, se puede resolver el caso más crítico.

En arenas, donde los sentamientos instantáneos son importantes y difíciles o imposibles de predecir, es ventajoso aplicar al terreno una gran carga muerta antes que la estructura se integre en un sistema indeterminado.

K. Terzaghi (12) ha efectuado una discusión muy completa del problema de la predicción de los sentamientos en suelos.

Cuando la estructura descansa directamente en la roca fundamental es innecesario calcular los sentamientos porque se sabe que son muy pequeños. Hay una excepción. En el caso de grandes tranques en arco fundados en la roca fundamental es también necesario determinar las deformaciones de la fundación en las alas y en la base. En el estudio de Grand Coulee Dam (8) las deformaciones de la superficie de la roca fueron calculadas usando un procedimiento desarrollado por F. Vogt (9) basado en la teoría de la elasticidad. Aunque en este método se ha hecho un gran número de aproximaciones, es el único disponible para calcular la deformación de una superficie de fundación en roca.

ESTABILIDAD

La estabilidad de un suelo, en una zona dentro de la fundación, se puede verificar comparando las fatigas determinadas teóricamente con la resistencia de muestras del suelo ensayadas en el laboratorio.

Los suelos fallan por cizalle, de acuerdo con la teoría de Mohr. Cuando se trata de arcillas o suelos impermeables es necesario corregir las fatigas normales en la presión del agua intersticial. La presión del agua intersticial depende del porcentaje de saturación del suelo. Por este motivo los ensayos de cizalle de suelos impermeables deben realizarse con muestras sin perturbar y con drenaje cohibido. Esto se consigue empleando la máquina de cizalle triaxial (14).

Otro método empleado para verificar la estabilidad de un suelo es el de deslizamientos virtuales, desarrollado en Suecia por Pettersson (15).

En el caso de una fundación en roca, el procedimiento corriente es comparar las fatigas normales aplicadas en la superficie con la fatiga máxima de compresión, sin confinar, de la roca. Las fatigas tangenciales se consideran tomando un cierto factor de seguridad contra deslizamientos.

El problema más importante en fundaciones en roca es probablemente la determinación de la fatiga máxima a compresión admisible para la roca in situ. Las muestras ensayadas corrientemente en el laboratorio son pequeñas y no representan el comportamiento mecánico de todo el volumen de roca, debido a que en la mayoría de los casos la roca está fracturada (Jointing).

CANTIDAD DE AGUA QUE ESCAPA POR FILTRACIÓN

En el caso de represas que deben almacenar agua que va a ser usada (energía, abastecimiento de agua o riego) la cantidad de agua que se puede perder por filtración a través de la represa y la fundación tiene un límite fijado por consideraciones

económicas. Es necesario entonces poder determinar la cantidad de agua que escapa por filtración.

El escurrimiento del agua a través de sedimentos y rocas sigue la ley de Darcy, siempre que los poros no sean muy grandes.

Forchheimer (16) ha desarrollado un procedimiento gráfico, basado en la ley de Darcy, para dibujar el «flow net» del agua que escurre en el interior del suelo.

Casagrande (17) ha efectuado una excelente exposición de este método además de algunas adiciones a él. El procedimiento gráfico mencionado sólo es aplicable a escurrimiento de 2 dimensiones.

Cuando las condiciones límites en el subsuelo son algo complicadas, el procedimiento gráfico para dibujar el «flow net» requiere mucho tiempo. Para determinar exacta y rápidamente el «flow net» se ha usado mucho la analogía hidráulica eléctrica. Aparentemente la primera aplicación de este método se debe a Vreedenburgh (19).

Los resultados de filtraciones predichas y medidas, bajo y a través de represas, concuerdan en forma satisfactoria como lo indica un estudio de 48 represas, 4 diques y 2 muros de sostenimiento efectuado por U. S. Waterways Experimental Station (18).

K. v. Terzaghi (20) ha efectuado una excelente discusión del efecto de «pequeños detalles geológicos» en la infiltración a través de fundaciones.

El problema de filtración a través de rocas consolidadas en una fundación se puede abordar sólo en una forma aproximada (21), pues aunque el escurrimiento en un pedazo de la roca sigue la ley de Darcy, fracturas o estructura vesicular, son responsables principalmente de la filtración. El efecto de estos factores es demasiado errático y complicado para poderlo estudiar analíticamente.

Como ejemplos sobresalientes de la forma de abordar el problema de filtración a través de roca, se pueden mencionar los estudios en el embalse de Grand Coulee (22), represa Owyhee (Wyoming, U. S. A.) represa Hales Bar (23) y la represa Madden (24).

«PIPING».

El escurrimiento del agua intersticial transmite a los granos de arena fuerzas que son paralelas a la dirección del escurrimiento, debido a las resistencias friccionales opuestas al escurrimiento. Cuando la dirección del escurrimiento es hacia arriba, el peso efectivo de los granitos del suelo es reducido por las fatigas friccionales y por la flotación. En el caso de arena o limo el escurrimiento del agua puede efectivamente producir la flotación de los granos del suelo siempre que el gradiente hidráulico de escape exceda un cierto valor crítico.

Este fenómeno de flotación de los granos del suelo, debido a un gradiente hidráulico de escape excesivo, se ha llamado «piping». Cuando se produce el «piping» puede resultar la destrucción total de la fundación casi sin aviso previo. Este fenómeno fué estudiado por primera vez por Bligh (25), quien como resultado de sus investigaciones indicó valores límites para el valor medio del gradiente hidráulico a lo largo del «flow net». Estos valores límites dependían del tipo de suelo. Terzaghi (20) ha discutido los resultados de Bligh demostrando que el método empleado por éste último no es adecuado ya que el gradiente hidráulico máximo es el factor controlante en vez del gradiente medio. La cantidad del agua que se infiltre no tiene una dependencia tan crítica en los «pequeños detalles geológicos».

Harza (26) ha efectuado una discusión satisfactoria de la aplicación práctica del control del «piping» empleando el gradiente máximo de escape.

CALIDAD DE LA SOBRECARGA (OBERBURDEN) Y PROFUNDIDAD A LA ROCA FUNDAMENTAL

PROFUNDIDAD NECESARIA DE EXPLORACIÓN

Para el proyecto de una estructura de cierta importancia es necesario conocer la calidad y el espesor de la sobrecarga, y también la profundidad y calidad de la roca fundamental. Hay varios caminos para obtener esta información.

La profundidad hasta la cual se debe extender la investigación depende de si el factor controlante son los sentamientos, la estabilidad, infiltración del agua o condiciones geológicas.

Cuando la estructura descansa en terrenos compresibles, la fundación debería ser investigada hasta una profundidad de aproximadamente 1,5 veces el ancho (27), y en caso que la roca fundamental esté a menor profundidad, hasta la roca fundamental.

Las condiciones que afectan la estabilidad de una estructura que descansa en suelos, depende probablemente de condiciones a menor profundidad que los sentamientos.

Cuando se consideran condiciones geológicas o la filtración del agua, no se pueden establecer límites a la profundidad necesaria de exploración. Esta profundidad depende en este caso de condiciones geológicas locales.

PERFORACIÓN, TESTIGOS, ENSAYO POZOS, GALERÍAS Y PIQUES

Para efectuar los cálculos de estabilidad y sentamientos es necesario tener muestras no alteradas de los suelos bajo la estructura. Para estudiar la percolación del agua y el «piping», es necesario tener perfiles representativos del suelo. La perforación es el mejor método para obtener muestras o propiedades físicas del suelo.

El sistema de perforación con chorro de agua (washboring) se puede emplear para obtener el perfil del suelo. Sondas de percusión y rotatorias montadas en camiones o patines se emplean generalmente para efectuar las perforaciones.

Para conseguir muestras no alteradas del suelo, se emplean sacatestigos especiales (driven, sampler) (28) y recientemente el sacatestigos Denison (29).

Se han empleado ensayos de bombeo de las perforaciones para medir la permeabilidad de los suelos. Para obtener testigos de roca se usa la sonda de diamante. Ensayos de presión de agua de las perforaciones se emplean a menudo para descubrir zonas débiles o fracturadas en la roca.

Galerías y piques se emplean como complemento de la perforación; tienen la ventaja sobre esta última de poderse inspeccionar visualmente la roca centímetro por centímetro.

Las galerías, piques y perforaciones efectuados con el objeto de exploración, se usan frecuentemente para inyectar cemento (grouting) en la fundación.

MEDIDAS DE RESISTIVIDAD.

El método geofísico de resistividad eléctrica se ha usado en ingeniería civil para determinar la profundidad hasta la roca fundamental y la posición del nivel del agua subterránea.

La primera aplicación en Estados Unidos de los métodos geofísicos en la investigación de fundaciones que se registra en la literatura, parece ser la determinación de la topografía de la roca fundamental enterrada bajo aproximadamente 300 pies de depósitos glaciales en la planta hidroeléctrica Fifteen Miles, New Hampshire. Este trabajo fué efectuado por Crosby y Kelly (1929).

Métodos similares fueron usados en Europa por M. Lugeon y Schlumberger (1932).

Posteriormente E. C. Leonardon (1931), Shepard (1935), Johnson (1937) y el U. S. Bureau of Reclamation han efectuado trabajos con el método de resistividad eléctrica aplicado a fundaciones.

La experiencia del U. S. Bureau of Reclamation con el método de resistividad no ha sido muy satisfactoria, con el resultado que el trabajo de resistividad eléctrica ha sido interrumpido completamente. En 1936 el U. S. Corps of Engineers debía examinar rápidamente cientos de fundaciones para represas. Se recurrió a la geofísica y se ensayaron diferentes métodos geofísicos. La conclusión respecto al método de resistividad fué que aunque en algunos casos se obtenían resultados favorables, ellos eran de tal naturaleza como para desalentar el extenso uso de este método en el estudio de fundaciones.

MÉTODO MAGNÉTICO

Juzgando por la literatura, se ha hecho muy poco uso o nada del método geofísico magnético en la exploración de fundaciones, debido tal vez a la dificultad en este caso de efectuar determinaciones de profundidad. Hay conveniencia sin embargo de usar curvas isogamas para la ubicación más conveniente de las perforaciones, tal como se ha hecho en el estudio de placeres mineros.

MÉTODO SÍSMICO DE REFRACCIÓN

Se ha efectuado bastante trabajo en los Estados Unidos con el sismógrafo de refracción en la exploración de terrenos de fundación.

Probablemente la primera aplicación del método sísmico de refracción para la delineación de la topografía de la roca fundamental escondida bajo una sobrecarga de sedimentos sin consolidar es debida a F. L. Partlo en 1934.

El U. S. Corps of Engineers ha examinado entre los años 1937 y 1940 doscientos veinticinco fundaciones para represas y varios canales en proyecto con el método sísmico de refracción. Los resultados generalmente concordaron con la perforación en menos de 5 pies.

El U. S. Bureau of Reclamation comenzó en 1941 a usar el sismógrafo de refracción con muy buenos resultados. También el U. S. Bureau of Public Roads ha usado extensamente este método de exploración.

COMPARACIÓN ENTRE LOS DIVERSOS MÉTODOS

El método más satisfactorio de explorar la fundación, considerando sólo la calidad de la información, es la perforación combinada con toma de testigos. Pero la perforación exige grandes gastos y requiere relativamente mucho tiempo en el terreno. Hay la conveniencia económica entonces de reemplazar la perforación por algún otro método.

El método sísmico de refracción tiene la ventaja de exigir un tiempo más corto de operación y un costo menor. En el caso de investigación preliminar el método sísmico de refracción exige un gasto de $1/3$ del costo de un programa equivalente de perforación y requiere sólo $1/3$ del tiempo. Para un levantamiento detallado el método sísmico exige sólo 10% del costo de perforación.

El esquema más económico parece ser el siguiente:

- 1) Exploración preliminar con el sismógrafo para poder comparar ubicaciones alternativas, y probablemente una perforación por alternativa.
- 2) Levantamiento sísmico detallado de la ubicación elegida para la fundación.
- 3) Perforación detallada de las fundaciones de estructuras de concreto.
- 4) Exploración mediante perforación y pozos de las zonas de empréstito.

ESTUDIO GEOLÓGICO

Es difícil fijar en forma definitiva el carácter del estudio geológico de una fundación. Un geólogo que tenga experiencia en el terreno, puede efectuar este trabajo si comprende claramente cuál es la información perseguida por el ingeniero a cargo del proyecto.

El geólogo debe dar su opinión sobre la resistencia de las rocas consolidadas. El ingeniero puede ensayar pequeñas muestras, pero los resultados de estos ensayos no representan el comportamiento mecánico de la roca in situ. Ya que el geólogo es un hombre acostumbrado a ver rocas y estructuras tales como fracturas (joints and fractures), planos de sedimentación, clivaje, etc. está en mejor posición que el ingeniero para juzgar una fundación en roca (consolidada).

Las posibilidades de deslizamientos de roca o tierra se pueden abordar desde un punto de vista geológico.

En ciertos casos sencillos la mecánica de suelos cuenta con métodos para estudiar la estabilidad de deslizamientos.

Las filtraciones a través de la roca fundamental es otro problema que debe ser considerado en el estudio geológico de la fundación de una represa.

A veces, mediante el levantamiento geológico es posible obtener alguna información sobre la profundidad a la roca fundamental.

La cantidad de descomposición (weathering) de la roca fundamental es una información muy importante, pues la profundidad de descomposición de la roca fija la cantidad de roca que es necesario remover para llegar a la roca sana. El geólogo generalmente puede hacer una estimación razonable de esta cantidad.

Los ingenieros generalmente temen mucho a las fallas geológicas y exigen a los geólogos un estudio detallado de ellas, si se presentan en la fundación. Hay varias razones que justifican esta actitud. En primer lugar si se produce algún desplazamiento a lo largo de una falla el resultado sería desastroso en estructuras rígidas, tales como tranques de albañilería, en arco o gravitacionales. Tal vez aún tranques de tierra fallarían debido al escape de agua si son cizallados por una falla geológica.

Además, la presencia de una falla generalmente implica la presencia de una ancha zona de debilidad: roca fracturada y «gouge». Esta zona debe ser removida y reemplazada por concreto, generalmente a un costo elevado. Siempre hay el peligro de filtraciones excesivas a través de estas zonas de debilidad.

En el estudio de la estabilidad y de la impermeabilidad de la fundación es necesario considerar la estratificación, porosidad y presentación de las capas.

B. G. F.

BIBLIOGRAFIA

- (1) F. KÖGLER.—Stress distribution in soils. International Congress of Soil Mechanics. Vol. III. 1936, p. 66.
- (2) D. KRYNINE.—Tangential stresses under a spread foundation. Int. Cong. Soil Mech. Vol I. 1936, p. 63.
- (3) O. K. FRÖHLICH.—Druckverteilung im Baugrunde. 1934, p. 23.
- (4) H. GRAY.—Stress distribution in elastic solids. Int. Cong. Soil Mech. Vol. III. 1936, p. 157.
- (5) N. N. PAVLOVSKI.—The percolation of water through earth dams. First Cong. of Large Dams. 1933.
- (6) L. F. HARZA.—Uplift and seepage under dams on sand. Trans. Am. Soc. Civ. Engrs. Vol. 100. Artículo 1920-1935.
- (7) J. H. A. BRAHTZ.—Pressures due to percolating water and their influence upon stresses in structures. Second Cong. Large Dams. 1936.
- (8) U. S. BUREAU OF RECLAMATION.—Final Reports Boulder Canjon Project. Vol 1. N.º 1, pp. 41 a 62.
- (9) F. VOGT.—Ueber die Berechnung der Fundamentdeformationen. Det Norske Videnskaps Akademi. Oslo. 1925.
- (10) LEO JURGENSON.—Application of the theories of plasticity and elasticity to foundation problems. Jour. Boston Soc. Civ. Engrs. Vol. 21. N.º 3. Julio 1934.
- (11) K. v. TERZAGHI.—Erdbaumechnik. Wien. 1925.
- (12) C. TERZAGHI.—Settlement of structures. Int. Cong. of Soil Mech. Vol. III. 1936. p. 85.
- (13) GREGORY TSCHBOTAREFF.—Comparison between consolidation, elastic and other properties established from laboratory tests and from observation of structures in Egypt. Int. Cong. Soil Mech. Vol. 1. Dl. pp. 33/36.
- (14) U. S. BUREAU OF RECLAMATION.—Triaxial shear and pore pressure test procedure. Julio 25. 1940.
- (15) K. E. PETTERSSON.—Kajraset i Goteborg den 5: te mars 1916. Tekn. T-1916. Vol. 30, pp. 281/287-u Vol. 31-pp. 289/291.
- (16) P. FORCHHEIMER.—Hydraulik. 1930.
- (17) A. CASAGRANDE.—Seepage through dams. New England Water Works Ass. Vol. 11, Junio 1937. N.º 2. pp. 131/172.
- (18) U. S. WATERWAYS EXPERIMENTAL STATION.—Soil Mechanics Fact Finding Survey. Tech. Mem. 175-1.
- (19) G. G. J. VREEDENBURGH.—Electric investigations of underground water flow nets. I nt. Cong. Soil Mech. Vol. 1-kl-pp. 219/222.
VREEDENBURGH AND STEVENS.—Elektrisch onderzoek van potentiaalstroomigen in veoistoffen inher byzondetoegepast opvekke grongwatertroomigen. De Ingenieur (Holanda). 1933. N.º 32.
- (20) K. v. TERZAGHI.—Effect of minor geologic details on the safety of dams. A. I. M. E. Tech. Pub. 215.
- (21) K. BRYAN.—Geology of reservoirs and dam sites. Water supply paper 597.
O. E. MEINZER.—Relation of ground water conditions to leakage of reservoirs. A. I. M. E. Tech. Pub. 215.

- (22) C. P. BERKEY.—G. G. Gordon. K. Irwin. Report of the geological investigations of the Grand Coulee Reservoir. U. S. Bureau of Reclamation. Aug. 15. 1940.
C. P. BERKEY.—W. F. Durand. Report on special features of the work by Board of Consulting Engineers on Grand Coulee Dam. Sept. 25. 1942.
 - (23) G. W. CHRISTIANS.—Asphalt grouting under Hales Bar Dam. Eng. News Rec. Vol. 96. Mayo 20. 1926.
 - (24) F. H. KELLOG.—Clay grouting at Madden Reservoir. Eng. News Rec. Vol. 109. Sept. 29. 1932.
 - (25) W. P. BLIGH.—Dams, barrages and weirs on porous foundations. Eng. News. Rec. 708. 1910.
 - (26) L. F. HARZA. Uplift and seepage under dams on sand. Trans. Am. Soc. Civ. Engrs. 1935. Vol. 100, artículo 1920.
 - (27) Id. (12), p. 86.
 - (28) LEGGET. Geology and engineering.
 - (29) H. L. JOHNSON.—A method of taking undisturbed overburden samples of cohesionless materials. Oct. 24-1934. War Dept. U. S. Engineer Office.
-