

1. LA IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS SUELOS

1.1 ORIGEN Y DESARROLLO DE UN SUELO

Suelo es una acumulación de materiales y minerales, sin cementación o poco cementados de espesor o niveles variables, que se extiende desde la corteza terrestre hasta la roca sólida; definido en el caso de la ingeniería civil como todo aquel material que el constructor utiliza para que sobre él, con él o a través de él edifique obras de ingeniería.

El origen de un suelo, proviene de la desintegración mecánica o descomposición química de la roca sólida ya sea ígnea, sedimentaria o metamórfica, en donde los mecanismos de esta transformación son variados y dependiendo de la roca de origen se logran diferentes tipos de suelo.

La desintegración mecánica es el resultado de diversos esfuerzos ocasionados por el sol mediante cambios en la temperatura; por el agua, que al penetrar por fisuras de las rocas y experimentar cambios al congelarse y deshielarse fractura la roca (véase la figura 1.1); por el viento, que mediante un continuo frotamiento con la roca produce partículas de forma redondeado (véase la figura 1.2) y por la combinación de ambos.

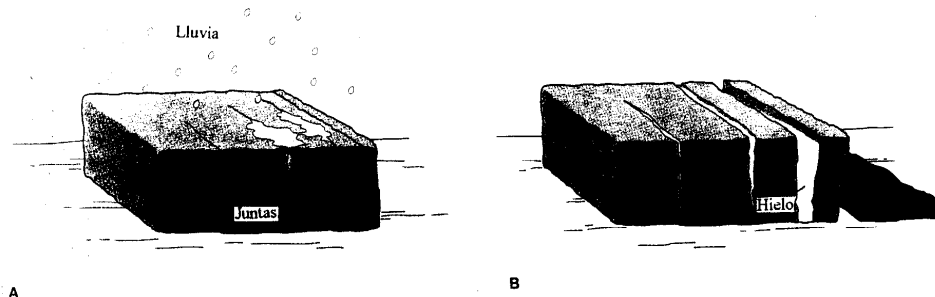


Figura 1.1. Desintegración o intemperismo mecánico ocasionado por el congelamiento del agua. (A) El agua rellena las juntas de la roca y luego se congela. (B) Al expandirse, el hielo separa en cuñas a la roca.



Figura 1.2. Desintegración o intemperismo mecánico ocasionado por el viento (intemperismo diferencial). La roca de la parte superior es más resistente que la inferior, ocasionando una desintegración más lenta de esta última parte.

Además de estos elementos interviene también otro aspecto que influye en las propiedades finales del suelo: el transporte, dando lugar a suelos transportados que son producto del acarreo del agua o viento, este proceso de desintegración produce partículas de suelo, con un rango amplio en su tamaño y forma.

El tamaño de las partículas, que se logran por medio de la desintegración y la influencia que tiene el agua al incorporarse al suelo (fundamental en el cambio de sus propiedades) nos muestra el comportamiento de éste frente a los diferentes requerimientos ingenieriles.

Cuando un suelo no es transportado y queda en el lugar de la roca que le dio origen se le llama suelo residual, generalmente son producto del intemperismo químico ocasionado por diferentes procesos como la oxidación, la carbonatación y la hidratación.

La *oxidación* sucede principalmente cuando las rocas que contienen hierro reciben oxígeno del aire por medio del agua de las lluvias, reaccionando químicamente y produciendo minerales arcillosos.

La *carbonatación* es la acción que logra el bióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O) mezclados a través de la lluvia en rocas que contienen fierro, calcio, magnesio o potasio (rocas ígneas) y que al reaccionar químicamente logra descomponer la roca.

Dentro de las rocas ígneas extrusivas donde el feldespato potásico es abundante (ortoclasa), el ácido carbónico reacciona con el hidrógeno modificando la estructura del feldespato y dando lugar a la arcilla denominada caolinita.

También, a consecuencia de la evaporación y la acción capilar se produce la precipitación de las sales de calcio que se quedan dentro del suelo (suelos calichosos). La roca denominada caliza, reacciona con el agua y forma cavernas por disolución.

La *hidratación* es la acción y el efecto de incorporar agua en un elemento, produciendo hidratos o compuestos químicos que contienen agua, que al absorberse en el suelo se combinan logrando nuevos minerales.

Todas estas acciones de intemperismo químico y desintegración mecánica nos dan origen a suelos inorgánicos. Por otro lado, los suelos orgánicos son producto de los restos de la vegetación y desechos del hombre, que por medio de la acción de microorganismos para su propia nutrición van dejando residuos de partículas finas llamadas humus; éstas, al mezclarse con partículas minerales dan origen a suelos orgánicos.

Los *tipos de suelo* son el resultado de las diferentes maneras de acción de las rocas y del efecto de transporte que producen partículas de diversos tamaños y formas. De ahí la importancia de definir, para fines de aplicación, los diversos tipos de suelo resultantes como los que a continuación se citan.

Las *gravas* son fragmentos de roca de más de 5 mm de diámetro (sin superar los 200 mm, en cuyo caso se consideran pedregones o boleos), que se forman principalmente como producto del transporte de los ríos, formando depósitos sobre los lechos o las riberas de éstos.

Se le denomina *arena* a los suelos de un tamaño menor a 5 mm y mayor de 0.05 mm. Su origen es el mismo que el de las gravas.

A estos materiales (gravas y arenas) se les llama de grano grueso y pueden estar bien graduados, cuando contienen partículas de todos los tamaños desde gruesas a finas o mal graduados, cuando se tienen partículas aproximadamente del mismo tamaño (uniforme) y de granulometría discontinua cuando tienen partículas de tamaño grueso uniforme y de tamaño fino uniforme, faltando partículas de tamaño intermedio entre los gruesos y los finos.

Las gravas y las arenas que al encontrarse limpias son materiales permeables, sin plasticidad, sin cohesión y poco compresibles son también llamados suelos granulares.

Los *limos* son suelos de grano fino al igual que todos los siguientes, de un diámetro entre 0.05 mm y 0.005 mm que tienen poca o ninguna plasticidad o cohesión (limos inorgánicos o polvo de roca) o que tienen características plásticas con poca permeabilidad y alta compresibilidad (limos orgánicos o limos plásticos), los primeros los encontramos como producto de las canteras y los segundos en lechos de ríos.

Las *arcillas* son materiales compuestos de partículas de roca extremadamente finas (menos de 0.005 mm) en forma generalmente de laminillas cristalinas, que al entrar en contacto con el agua manifiesta propiedades de gran relevancia en aplicaciones constructivas (compresibilidad, expansión, reducción de resistencia al corte, etc.)

Lo anterior debido al pequeño tamaño de las partículas, a su forma laminar o aciculada y al efecto de la tensión superficial. Estos suelos se caracterizan por ser plásticos, cohesivos y poseen la facultad de absorber iones.

Hardpan es un término que se utiliza para denominar un tipo de material compuesto por arena y grava cementada en su mayor parte por arcilla, que a base de enormes presiones ha logrado una gran densidad y que no es posible ablandarse con agua.

La *morrena* es una mezcla de grava, arena y limos con un poco de arcillas que son depositados por la acción glacial y pueden no estar compactados por presión.

El *caliche* es una mezcla de grava, arena, limos y arcillas cementadas entre sí por medio de sales como el carbonato de calcio. Existen comúnmente en regiones desérticas en donde, por medio del proceso de evaporación (humedad ascendente) del agua superficial, se deposita el carbonato de calcio en las capas superiores del suelo, dando lugar en los estratos de caliche. Pueden ser suelos muy reacios al ataque de pico y pala.

La *tierra vegetal* es un suelo de gran utilidad en la agricultura, es el producto de una combinación de arena limo y arcilla con el humus, llamándosele también capa superficial del suelo (topsoil), distinguiéndose del suelo propiamente útil para la construcción porque éste no contiene o casi no contiene materia orgánica.

El *adobe* es un tipo de arcilla de aluvión de característica pegajosa, que al absorber agua se hincha y al secarse se contrae y se agrieta, es común en climas secos y ocasiona grandes daños cuando se utiliza en obras de cimentaciones y caminos.

La *turba* es un suelo formado por materia orgánica parcialmente descompuesta que se forma en lugares pantanosos, de color café o negro mezclado con diversas cantidades de tierra y que resultan muy compresibles, por lo tanto no se recomienda utilizarlo para apoyos de terraplenes o estructuras.

El *loess* es un limo de partículas uniformes depositadas por el viento, de baja densidad, poroso, difícil de compactar y que al saturarse se vuelve muy compresible (colapsable).

La *bentonita* es un material originado por la descomposición de cenizas volcánicas que tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua y cambiar sus características, ya sea cuando se seca (fuertes contracciones y grietas) o cuando se satura (hinchamientos y presiones de expansión). Este material forma parte de la familia de arcillas conocidas con el nombre común de montmorilonita.

1.2. LÁMINAS ARCILLOSAS

Las láminas arcillosas son el producto final de la descomposición química que sufren las rocas, convirtiéndose en microscópicas partículas minerales que al formar parte de un suelo y mezclarse con agua obtienen propiedades plásticas, influyendo en el comportamiento de sus propiedades de compresibilidad, resistencia y permeabilidad.

El comportamiento de un suelo con un 5% o más de estas partículas minerales dependerá de las características de sus láminas arcillosas, por eso es importante conocer cuál es su composición mineralógica, estructura, grupos y propiedades, para así determinar la respuesta del suelo.

Un mineral es una sustancia inorgánica que la encontramos de una manera natural, con composición química definida y propiedades físicas características. Los minerales arcillosos tienen forma cristalina y están formados por diferentes estructuras, la estructura tetraédrica en la cual un átomo de silicio está rodeado por cuatro átomos de oxígeno (véase la figura 1.3) y la estructura octaédrica en donde un átomo de aluminio o magnesio está rodeado por seis grupos de oxhidrilos, tal como se muestra en la figura 1.4.

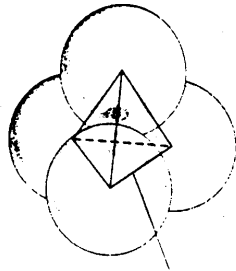


Figura 1.3. Lámina tetraédrica

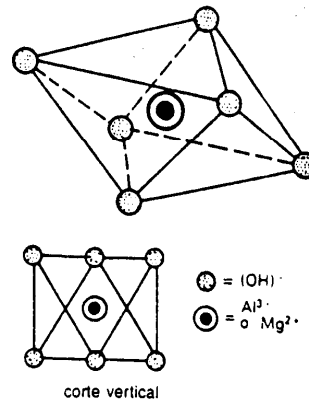


Figura 1.4. Lámina octaédrica

Estas láminas arcillosas, presentan propiedades de adhesión y plasticidad, de acuerdo a una actividad electroquímica originada por su carga negativa neta y su afinidad por el agua, estas propiedades se manifiestan de manera proporcional a los rangos de humedad capaces de

tomar, es decir, a mayor intervalo de humedad disponible se tendrá un comportamiento más marcado.

De acuerdo a como se unen entre sí las diferentes estructuras laminares y a su composición química, encontramos que dan lugar principalmente a tres diferentes grupos de arcillas: caolinitas, ilitas y montmorilonitas.

Las *caolinitas* se deben a la carbonatación de la ortoclasa y están formadas por la lámina silícica y una lámina aluminica unidas entre sí indefinidamente por enlaces iónicos de hidrógeno, creando una estructura estable que no permite fácilmente la penetración de moléculas de agua. Estas arcillas presentan una baja absorción al agua y una susceptibilidad a la retracción y expansión, al ser sometidas a variaciones de humedad.

Las *ilitas* son el producto de la hidratación de las micas y su constitución interna tiene tendencia a formar grumos de material por la presencia de iones de potasio, reduciéndose el área expuesta al agua, siendo un poco más expansiva que la caolinita.

Las *montmorilonitas* se forman por la superposición indefinida de una lámina aluminica entre dos láminas silícicas, en este caso la unión entre las retículas es débil por lo que las moléculas de agua se mezclan con bastante facilidad, estas arcillas sufren fuerte expansión provocando inestabilidad entre ellas.

Estructuras de las arcillas. En las arcillas se define la macroestructura o estructura secundaria y la microestructura o estructura primaria; en la primera, químicamente la encontramos en depósitos donde es posible definir características de estratificación, fisuración, juntas de rocas y los restos orgánicos que exhiben estructuras uniformes, en donde no hay variación de estratos visibles. También podemos encontrar estructuras laminadas, las cuales poseen capas delgadas de menos de 25 mm de espesor y paralelas entre ellas, como las originadas por deshielo de los glaciares y que se denominan arcillas varvadas.

Existen depósitos de arcillas fisuradas llamadas así porque presentan en su estado natural una red de grietas capilares uniformes o fisuras, esto se debe a movimientos previos y a

altos esfuerzos entre las arcillas, teniendo una alta inestabilidad o propensas a cambio de volumen al momento de disecarse, contrariamente los depósitos que no tienen evidencia de fisuración se les llama depósitos intactos.

El lograr tener una clara definición de una macroestructura de un depósito de arcilla, nos permite determinar su posible comportamiento ingenieril conociendo de esta manera planos de debilidad o mayor resistencia del depósito. La segunda estructura corresponde a la microestructura o estructura primaria, la cual es un arreglo estructural de partículas o grupos de partículas de un depósito de arcillas que se forma de una manera compleja y difícil, dando como resultado diferentes estructuras primarias, siendo las más comunes la floculenta y la dispersa.

La *estructura floculada* se forma comúnmente en depósitos de agua salada, por medio de un proceso de sedimentación en donde las partículas de diámetro pequeño se adhieren con fuerza y se sedimentan juntas. El borde o la orilla de una laminilla tiende a ser atraída a la cara plana de la otra, esto se debe a la existencia de electrolitos en el agua que neutralizan sus cargas chocando entre sí y adhiriéndose, formando floculos de mayor masa que tienden a unirse formando panales que se depositan en el fondo de una manera difusa, dando origen a una estructura floculenta.

La *estructura dispersa* tiene cargas eléctricas semejantes por lo que se repelen entre sí y se ponen casi paralelas, ejerciéndose entre ellas presiones osmóticas que son inversamente proporcionales a la distancia entre ellas, estas formaciones se encuentran con mayor frecuencia en depósitos de agua dulce.

Los dos tipos de estructuración primaria —floculenta y dispersa— se esquematizan en las figuras 1.5 y 1.6.

Como resultado de la forma laminar de las arcillas y lo pequeño de sus partículas, encontramos diferentes propiedades que nos van a servir, primero para lograr clasificar e identificar los tipos de suelos y después para lograr la descripción más completa del suelo en su conjunto, lo que nos permitirá conocer su comportamiento bajo cargas cuando el terreno

presente diferentes contenidos de humedad, estas propiedades son las siguientes: sensibilidad, plasticidad y cohesión, carga superficial y adsorción, superficie específica, intercambio básico de cationes y expansión y contracción, las cuales están íntimamente relacionadas con las propiedades en conjunto del suelo como son la compresibilidad, la resistencia y la permeabilidad.

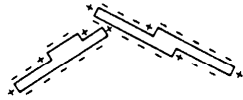


Figura 1.5. Estructura floculada de las partículas arcillosas originada por la interacción orilla-cara de sus láminas (medios marinos, altas concentraciones de cationes)

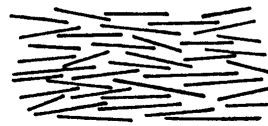


Figura 1.6. Estructura dispersa de las arcillas debido al rechazo entre sus capas de adsorción (medios lacustres, bajas concentraciones de cationes)

La *sensibilidad* de una arcilla es la relación que existe entre su resistencia de compresión simple en estado inalterado y su misma resistencia en estado remoldeado.

La mayoría de las arcillas vuelven más o menos lentamente a sus propiedades originales, las arcillas montmorilonitas presentan una mayor capacidad para recobrar rápidamente sus características de resistencia tras un enérgico amasado, a esta propiedad se le llama *tixotropía*. La mayor parte de las arcillas tienen un rango de sensibilidad de 1 a 4, mientras que las arcillas rápidas alcanzan valores hasta de 100, en la tabla 1.1 se da la descripción de los grados de sensibilidad considerados en la práctica.

Tabla 1.1. Grados de sensibilidad	
Sensibilidad	Descripción
1 a 2	Insensitivas
2 a 4	Medianamente sensitivas
4 a 8	Sensitivas
8 a 16	Muy sensitivas
> 16	Rápidas

La *plasticidad* es la capacidad que tienen las arcillas de experimentar deformaciones irreversibles sin romperse ni agrietarse en un rango de humedad variable. Existe una relación directa entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas de las arcillas, debido a que sus partículas finas de forma laminar y carga eléctrica atraen el lado positivo de las moléculas de agua.

La *cohesión* es la propiedad que presentan las partículas de adherirse entre ellas mismas, al desarrollarse fuerzas de atracción entre partículas que dan origen a una tensión superficial o fuerza capilar. Estos suelos poseen una alta proporción de vacíos comparados con los suelos granulares.

La *carga superficial y adsorción* se debe a la formación estructural de la lámina de sílice y aluminio. Sabemos que su forma exterior tanto de una como de la otra, están constituida por iones hidrógeno y oxhidrilo, respectivamente, que de acuerdo a su estructura iónica corresponden a cargas eléctricas negativas, como resultado de estas cargas negativas netas, una parte del agua en los vacíos del suelo es atraída y se adhiere fuertemente a las superficies de las partículas de arcilla llamándose *agua absorbida*.

Cada partícula de arcilla queda rodeada de moléculas de agua adsorbida cuyas moléculas se orientan de tal manera que pueden seguir atrayendo otras moléculas de agua o cationes de diferente especie, lo cual estará en función de la composición de la arcilla. Los cationes de diferentes elementos químicos como el Na^+ , el Ca^{++} , el Mg^{++} , el Al^{+++} , y el Fe^{+++} son atraídos por las láminas arcillosas o las moléculas de agua de la capa adsorbida logrando un mayor espesor de la película de dicha capa

Las presiones de adsorción varían de acuerdo con la estructura de la partícula. Se ha determinado un valor de presión del orden de $20,000 \text{ kg/cm}^2$, esta presión está relacionada con el punto de congelación del agua, en donde se ha encontrado que para una presión de $10,000 \text{ kg/cm}^2$ el agua se congela a los 30°C ; por lo que se puede decir que un suelo normalmente tendrá las propiedades similares a las del hielo sólido y mientras más se alejen las moléculas de la partícula, las presiones de adsorción serán menores hasta encontrarse en estado libre.

La *superficie específica* es el resultado originado por la forma laminar de las partículas, hecho que incrementa fuertemente el área expuesta por unidad de peso; así, tenemos que un gramo de montmorilonita nos da un área específica total de 800 m², aumentando de gran manera su actividad electromagnética, su capacidad de intercambio de cationes y su adsorción de agua.

Aunque las fuerzas de tensión del agua es poca, en el caso de la arcilla resulta grande por las enormes áreas superficiales a la que está expuesta, aumentando de gran manera su actividad. En la tabla 1.2 se muestran las superficies específicas de diferentes tipos de suelos.

Tabla 1.2. Superficies específicas y contenido de agua adsorbida

Mineral	Superficie específica Se (m ² /g)	Contenido aproximado de agua adsorbida (%)
Arena de cuarzo (0.1 mm)	0.02	1 x 10 ⁻³
Caolinita	20	1
Ilita	80	4
Montmorilonita	800	40

El *intercambio básico* es la capacidad que tiene el mineral de arcilla para intercambiar cationes entre el agua y la película adsorbida. Esta propiedad crece con el grado de acidez del mineral, entre menor pH mayor será la actividad de intercambio básico del suelo.

Las caolinitas tienen menor capacidad de intercambio que las ilitas y las montmorilonitas, estas últimas son las que presentan mayor incremento en la actividad; por lo tanto, mayor plasticidad y menor resistencia del suelo.

El grado de preferencia en el intercambio está dado de acuerdo a la siguiente secuencia: Al⁺⁺⁺ > H₃O⁺ > Li⁺⁺ > Mg⁺⁺ > K⁺ > Na⁺

Los fenómenos de *expansión y contracción* suceden cuando las arcillas experimentan cambios de contenido de agua. En el caso especial de la arcilla montmorilonita, que de acuerdo a su pequeño tamaño y débil unión entre sus láminas, éstas son muy inestables en presencia de agua. Las moléculas de agua al ser adsorbidas por láminas arcillosas dan como resultado un aumento de volumen, llegando a veces a alcanzar presiones de expansión hasta de 50 ton/m², suficiente para hacer daño en cualquier construcción de regular tamaño.

Estas arcillas también sufren el fenómeno de contracción al momento de perder la humedad por evaporación, de ahí que se considere como nombre más adecuado el de arcillas activas. La figura 1.7 sirve para explicar el fenómeno de contracción y expansión.

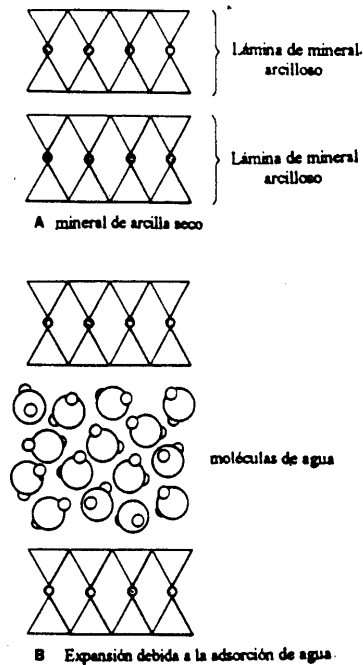


Figura 1.7. Arcillas expansivas

1.3. EL PROGRESO EN EL ESTUDIO DE LOS SUELOS

En la antigüedad y a través del tiempo, necesidades sociales han obligado al hombre a ser creativos con el fin de salir adelante ante las adversidades naturales, la influencia de creencias religiosas, los requerimientos de comunicación y comercio; en suma, el entorno humano se ha vuelto más cómodo tras vencer múltiples obstáculos.

Ante estas necesidades el hombre desde la antigüedad ha construido estructuras para ceremonias religiosas, canales y diques para el transporte a lo largo de cuerpos de agua, senderos, caminos y pesadas fortificaciones. No existió ningún reglamento o norma para lograr este tipo de construcciones, de tal manera que la necesidad de hacerlo fue creando la

experiencia y el conocimiento del comportamiento de la estructura y el suelo como soporte de la carga, de tal forma que con la experiencia y la observación de fallas, se fueron interpretando y relacionando diversos factores que intervienen en el comportamiento de un suelo, como el hecho de que no en cualquier parte se encuentra el mismo tipo de terreno y que la humedad era un factor importante a considerar en su resistencia y estabilidad.

Estas experiencias y conocimientos fueron transmitidos a nuevas generaciones por medio de la palabra oral y escrita. Existen documentos antiguos como el *dschou-li*, un libro sobre las costumbres de la dinastía china *dschou*, escrito hace aproximadamente 3000 años a. C. Contiene instrucciones sobre la construcción de caminos y puentes y con él fue construido el camino más antiguo en la historia del mundo, "el camino real" a través del suroeste de Asia y Asia Menor.

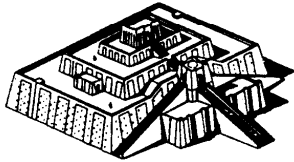


Figura 1.8. Reconstrucción de un Ziggurat (estructura religiosa) en Ur, Alrededor del año 2,000 a.C.



Figura 1.9. Sección norte-sur de la pirámide de Sahure. 2,400 a. C. aproximadamente



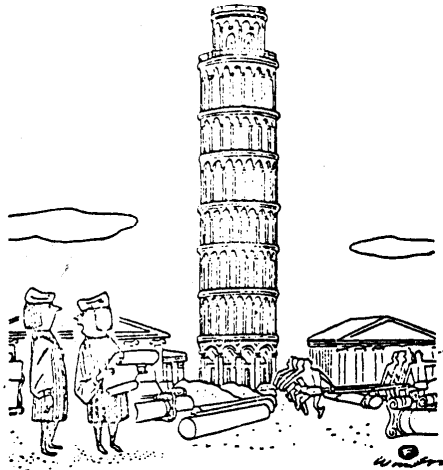
Figura 1.10. Camino griego de rodadas con ramal lateral

Una época sobresaliente en donde los avances fueron notables, ocurrió durante el imperio romano en el que fueron erigidas estructuras de gran tamaño, exigiéndose un mayor cuidado en la cimentación, no obstante que el conocimiento y las habilidades seguían basadas fuertemente en la experiencia.

La historia fue escrita por talentosos constructores como el arquitecto romano Marco Vitrubio Polion, quien en su libro once de sus diez libros sobre arquitectura reconoce la existencia de varios tipos de suelos con características y comportamientos diferentes,

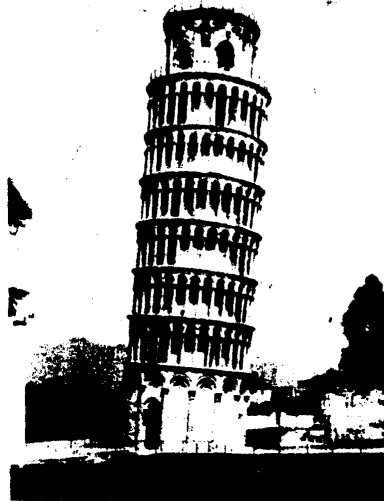
visualiza la importancia de la humedad en los suelos, hace recomendaciones sobre el desplante de la cimentación en una base sólida y menciona además la utilización de pilotes en terrenos pantanosos.

En la edad media, con la caída del imperio romano, obras de infraestructura de gran importancia como puentes, diques y drenajes sufren un estancamiento. En esta época se le da mucha importancia a la construcción de fortificaciones y estructuras religiosas. Dependiendo de la capacidad de carga de los suelos donde se asentaban estos grandes edificios, las deformaciones se fueron dando a través de los años, verificándose serios hundimientos en las estructuras, algunos templos que sobreviven en nuestros días como el Domo de Labeck, en Alemania; el Domo de Königsberg al este de Prusia; el Campanario de San Jorge en Zaragoza y la Torre de Pisa en Italia, son ejemplo de esto.

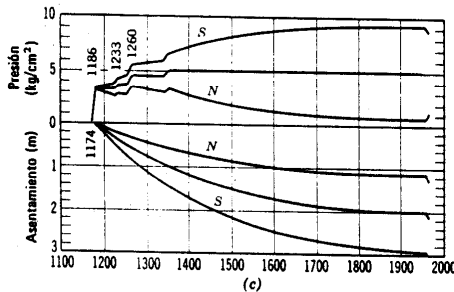


"¡Sí, he escatimado un poco en la cimentación pero eso no se sabrá nunca!"

(a)



(b)



(c)

Figura 1.11. Torre inclinada de Pisa. (a) y (b) Tomado de la Conferencia sobre Asentamientos, ASCE 1974 y (c) según Terracina.

Durante los siglos XVII y XVIII, los constructores le dan gran importancia a proteger las edificaciones del agua, controlándola mediante drenes superficiales. Se observa que uno de los factores más importantes que el hombre tiene que tomar en cuenta en el comportamiento de un suelo es el agua y que el control de ésta garantiza el buen funcionamiento de una edificación.

Se establece en Europa la primera escuela de ingeniería llamada Escuela de Puentes y Caminos (Ecole des Ponts et Chaussées) fundada en París, donde se impartían los principios científicos conocidos hasta ese tiempo, los cuales se aplicarían en la rama de la construcción. Se da una gran importancia en el estudio de cimentaciones y se enfoca mucho el estudio a la construcción de muros de retención. En 1773 Charles A. Coulomb presenta su ensayo sobre las reglas de máximos y mínimos que aplicó a las leyes de fricción y cohesión para la resistencia de una masa de suelo.

Una vez pasada la revolución americana los gobiernos se establecen, la industria y el comercio se expanden y se da un gran auge en la construcción de caminos, canales, ferrocarriles y puertos. Se inicia el tipo de construcción ligera y se evita construir edificios en áreas de suelos malos.

Coulomb establece por 1773 en sus "Memorias sobre Muros de Retención y Equilibrio de Arcos" lo siguiente: "*...varias causas realmente se combinan para incrementar las dimensiones de los muros de retención; algunas de ellas son: primero, la fricción de la tierra contra la mampostería no es tan grande como la de la tierra sobre sí misma; segundo, frecuentemente el agua que se filtra a través de la tierra se acumula entre ésta y la mampostería generando niveles de agua que sustituyen a la presión de un fluido sin fricción por presión de tierra y tercero, la humedad cambia no sólo el peso de la tierra sino también su fricción....*". Esto fue el principio de lo que más tarde se conoció como presión hidrostática.

Proliferó la construcción de ferrocarriles en la década de 1830, apareciendo nuevos problemas de capacidad de carga debido al enorme peso que significaban las máquinas y el pequeño espacio en que debería distribuirse la carga, por la razón que se redujo mucho el ancho de vía. A su vez esta reducción se debía a la búsqueda de un menor monto de inversión

en la construcción, ya que se gastaba mucho en cortes, terraplenes y protecciones porque no se podían desarrollar grandes pendientes ni curvas cerradas. Winkler con su teoría del balasto propone una solución elástica a este problema.

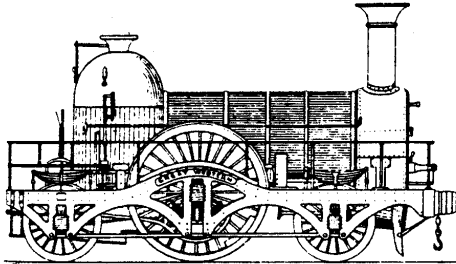


Figura 1.12. La locomotora "Colossal", de Gooch fabricada para la Great Western Railway en 1846

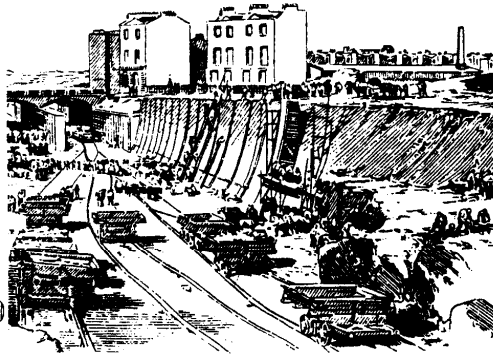


Figura 1.13. Construcción de un muro de contención en la estación Camden Town, Londres, 1837

Se comienza a estudiar el fenómeno de la capacidad de carga de manera sistemática a partir de 1870, fecha en que en la ciudad de Chicago Illinois, nació el concepto tal y como actualmente se trata. A partir de esa fecha la idea cobró gran importancia y fue involucrada en todos los estudios sobre cimentaciones.

La ASCE (por sus siglas en inglés: American Society of Civil Engineering, Sociedad Americana de Ingenieros Civiles) fomentó desde 1913 la recolección de datos y conceptos relacionados con el diseño de cimentaciones. En 1936, la Universidad de Harvard organizó la primera conferencia sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones en Cambridge, Massachusetts a la que han seguido convenciones periódicas encargadas de verificar el desarrollo y continuos descubrimientos hechos en este campo.

En 1925, Karl Von Terzaghi demostró la importancia de la fase líquida en los asentamientos a largo plazo que se presentan bajo la acción de una carga sobre una arcilla. En este mismo año se establecieron los temas de investigación requeridos en mecánica de suelos.

Las líneas de investigación propuestas por Terzaghi incluían, entre otros aspectos, el estudio objeto de nuestro trabajo, la capacidad de carga; en el resto, se da una importancia fundamental a la presencia de humedad dentro de la masa térrea. Estos temas de investigación fueron los siguientes:

1. Capacidad de carga del terreno
2. Cimentación piloteada
3. Deslizamiento de tierras
4. Fenómeno de licuación de arenas
5. Cantidad de agua que fluye hacia los pozos
6. Ataguías
7. Presas

1.4. APLICACIÓN A CIMENTACIONES

A través de la historia, debido a necesidades constructivas, el hombre ha tenido que estudiar y definir los distintos tipos de suelos, así como su comportamiento ante la presencia de diferentes factores (agua, aplicaciones de grandes cargas, estructuras vecinas, etc.). Ha logrado solucionar algunos problemas con la experiencia adquirida en base a la prueba y el error.

La dedicación y el estudio experimental científico sobre la mecánica de suelos de grandes personajes como Coulomb, Telford, McAdam, Collin, Terzaghi y Casagrande quienes han aportado a la ciencia conocimientos emanados de la experimentación, soporte actual para determinar el tratamiento que se debe dar a un suelo al ser empleado en el diseño de cimentaciones.

La cimentación es el elemento estructural en una edificación cuya función es distribuir adecuadamente las cargas bajo el suelo que le sirve de apoyo. Existen dos tipos de cimentaciones, la *superficial* cuando el suelo donde se sitúa la estructura es apto para soportar la carga aplicada (véase la figura 1.14) y *profunda*, cuando el terreno apropiado para el soporte

de la carga no se encuentra inmediatamente debajo de la estructura, sino metros más abajo y para llegar a él es necesario la utilización de pilotes, pilas o cajones (véase la figura 1.15).

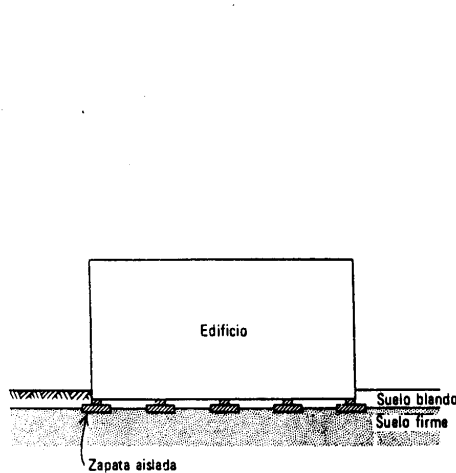


Figura 1.14. Ejemplo de cimentación superficial

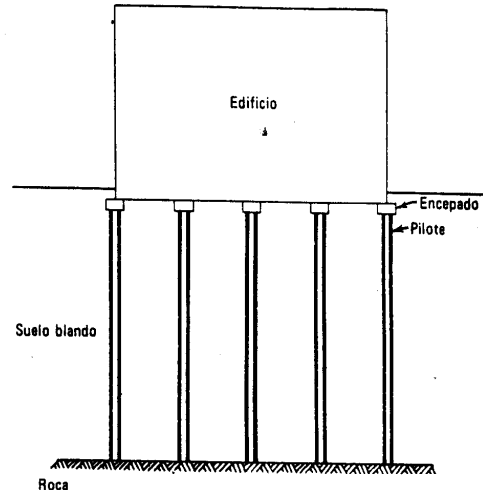


Figura 1.15. Ejemplo de cimentación profunda

Otro ejemplo típico de cimentación superficial que muestra una variante especial es el del edificio del Instituto Tecnológico de Massachusetts, en él se empleó una losa de cimentación diseñada por el método *cimentación compensada*. Debido a la constitución del suelo se esperaba un asentamiento de 30 cm del edificio, ya que uno de los estratos blandos al recibir la carga de la estructura se consolidaría en órdenes de magnitud que darían ese asentamiento en la superficie; por lo que se tomó la decisión de asentar el edificio a una profundidad tal que el peso del suelo, producto de la excavación, representara un porcentaje alto de la carga total del edificio, reduciendo de una manera considerable el asentamiento esperado en condiciones normales. En este caso se llama *compensación parcial*, en el caso donde el peso del volumen de la excavación sea similar al del peso del edificio se llamaría *compensación total*. En la figura 1.16 se detalla esta aplicación.

Los principales factores que se deben de tomar en cuenta y buscarle solución son:

1. Profundidad de desplante
2. Protección de las paredes de la excavación
3. Método para abatir el nivel del agua
4. Tipo y magnitud del asentamiento
5. Diseño de la losa de cimentación

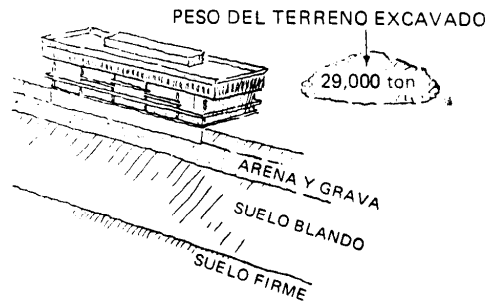


Figura 1.16. Edificio del MIT a base de losa de cimentación (compensación parcial)

Otro caso de interés es el de una cimentación *piloteada*, la cual consiste en el hincado de pilotes hasta encontrar terreno firme, proyectada también para el MIT, siendo importante mencionar el procedimiento. Se hicieron perforaciones de las primeras $\frac{3}{4}$ partes de la longitud del pilote, esto para evitar que el suelo se rigidizara y expandiera lateralmente afectando la estructura vecina (una estructura en forma de cúpula que aparece en la figura 1.17), enseguida se procedió a hincar tubos huecos de acero de 32 cm de diámetro hasta terreno firme, se relleno de concreto y se selló la parte superior del tubo con una placa de acero para prevenir la erosión de la tierra que rodea al extremo. Esta clase de pilotes que se apoyan en terreno firme se les llama de *punta* para diferenciarlos de los de *fricción*, en los que la resistencia se da por contacto entre el fuste y el terreno circundante.

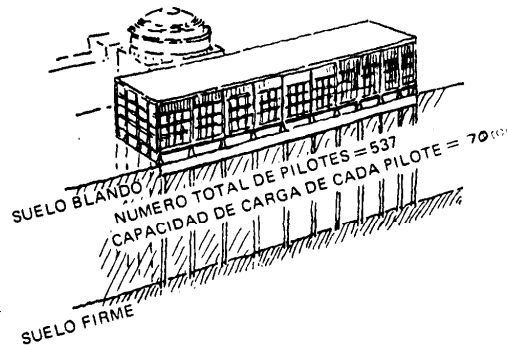


Figura 1.17. Cimentación piloteada para un edificio del MIT

Se menciona que de no haberse efectuado las perforaciones en las $\frac{3}{4}$ partes de la longitud del pilote, el terreno se hubiera hinchado 30 cm a causa del volumen ocupado por el hincado, en este caso de 537 pilotes, y esto a su vez desnivelaría y levantaría pilotes ya colocados además de afectar, como ya se dijo, cimentaciones existentes.

En el uso de este tipo de cimentación es importante la consideración de los siguientes puntos:

1. Tipo y carga admisible del pilote a utilizar
2. Separación y modo de colocación de los pilotes
3. Secuencia en su colocación
4. Evaluación de daños a estructuras vecinas

En la construcción de la cimentación de la Torre Latinoamericana en la Ciudad de México (véase la figura 1.18), se utilizaron los métodos combinado de compensación y pilotes de punta, en este caso se hincaron 361 pilotes hasta una profundidad de 33.5 m apoyándose en un estrato arenoso de 5.20 m de espesor, la presión sobre la arcilla se redujo hasta un 53% del peso del edificio (compensación parcial), debido a la construcción de un sótano de 13 m de profundidad. Como información que avala el ingenioso diseño de esta cimentación reconocida a nivel internacional, la torre ha resistido sin daño los sismos del 28 de julio de 1957 y el del 19 de septiembre de 1985.

Es de gran importancia en un diseño adecuado de las cimentaciones tomar en cuenta la resistencia al corte del suelo (capacidad de carga), así como el tipo y magnitud del asentamiento.

Ocasiona más daño un asentamiento *diferencial* que uno *total*, ya que propicia la aparición de grietas en muros y en casos graves acerca más a la estructura a su punto de vuelco.

Dos ejemplos clásicos de asentamiento son el ocurrido en el Palacio de Bellas Artes de la Cd. de México, en donde se ha dado un asentamiento total de 3.60 m con respecto a la calle y el que ha experimentado y casi colapsado la Torre de Pisa en Italia, la cual presenta un asentamiento diferencial (el lado sur se ha asentado 3.0 m mientras que el lado norte sólo 1.50 m, véase la figura 1.11).

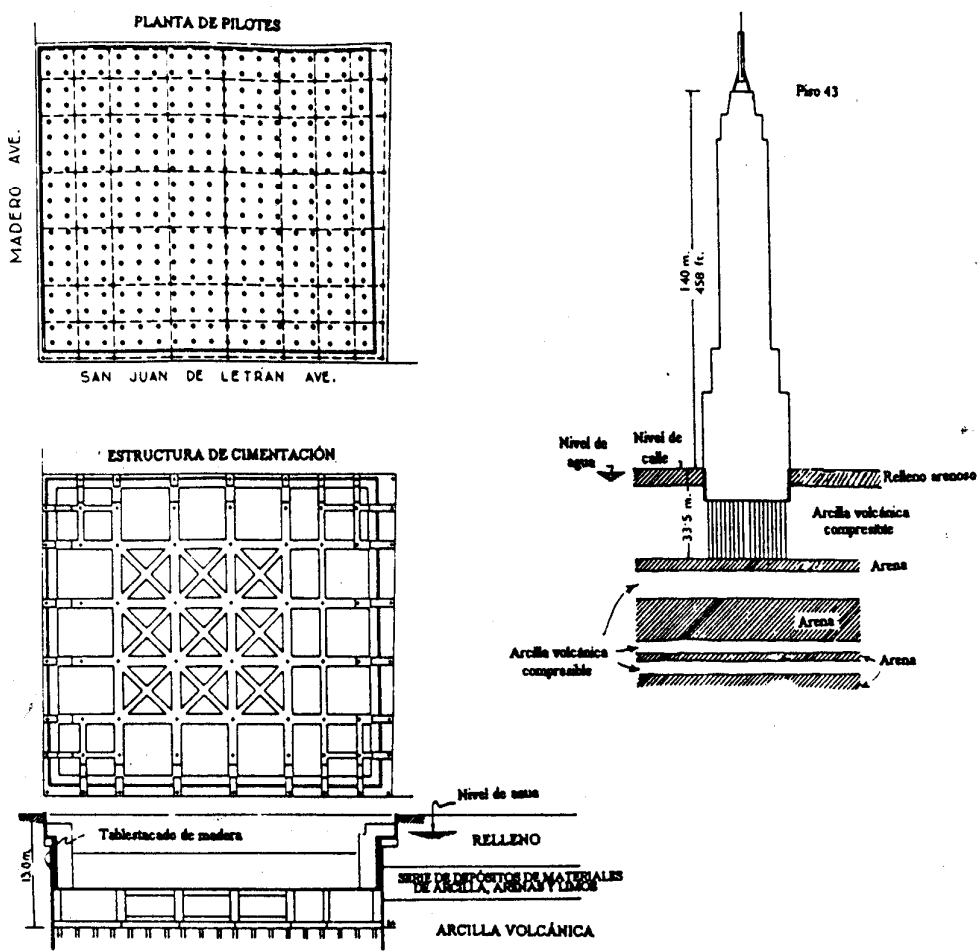


Figura 1.18. Detalle de la cimentación compensada y piloteada empleada en la Torre Latinoamericana de la Cd. México

2. CONCEPTOS DE CAPACIDAD DE CARGA

2.1. INTRODUCCIÓN. IDEAS BÁSICAS

El análisis de capacidad de carga representa un paso importante en la evaluación de la estabilidad y economía de las cimentaciones superficiales, junto con el análisis de asentamientos resultan factores determinantes en el diseño adecuado de cimentaciones.

Antes de 1857 el cálculo de cimentaciones se hacía de una manera empírica y basada más que todo en resultados experimentales; a partir de esta fecha, Rankine utiliza criterios más racionales para el diseño de cimentaciones. Otros como Prandtl, Buisman y Terzaghi propusieron soluciones más científicas para el estudio de capacidad de carga.

Hay varias consideraciones que el ingeniero debe tomar en cuenta para decidir sobre un tipo de cimentación, entre otras se citan la función de la estructura, las cargas que debe soportar, las condiciones del subsuelo y el costo comparado con el resto de la estructura, pero además hay algunos principios generales e hipótesis que sobresalen: la distribución de presiones, la capacidad de carga, la magnitud y tipo del asentamiento, las cargas de proyecto, y los modos de falla que nos van a permitir conocer el comportamiento más probable de cada tipo de cimentación para cada tipo de subsuelo, haciendo posible desarrollar así un procedimiento más racional para el diseño de cimentaciones

Distribución de presiones. Existe al momento de aplicar una carga y transmitirla al suelo por medio de la cimentación, una reacción del mismo suelo que dependerá del tipo y magnitud de la carga enviada y de la naturaleza del suelo, según se muestra en la figura 2.1.

En el caso de las arenas vemos que la distribución tiende a un máximo en los extremos (cimiento pequeño) y disminuye hacia las orillas, lo que ocasiona que los momentos reales sean menores que los calculados al utilizar la distribución uniforme considerada en

todos los diseños de cimentaciones. Por el contrario, en arcillas la presión se hace máxima en las orillas y, en este caso, los momentos reales son mayores que los calculados, diferencia que se compensa por los factores de seguridad empleados (del orden de 3).



Figura 2.1. Variación de la presión con el tipo de suelo

Cuando tenemos una carga sobre una zapata, las trayectorias de falla por debajo de la superficie de contacto adoptan la forma mostrada en el modelo de laboratorio de la figura 2.2, a partir de este modelo se deducen las diferentes teorías que veremos más adelante.



Figura 2.2. Prueba de falla sobre un modelo de zapata. Puede notarse la distorsión de los estratos iniciales

Capacidad de carga y asentamientos. Después de haber determinado, de acuerdo a las condiciones del lugar, el tipo de cimentación ideal para el proyecto, es necesario tomar en cuenta la funcionalidad de la cimentación con respecto a dos tipos de problemas. Por una parte se puede presentar una falla ya sea local o general porque el suelo no es capaz de so-

portar la carga (figura 2.3) o que la estructura sufra asentamiento general o diferencial, resultando daños de construcción, como los mostrados en la figura 2.4.

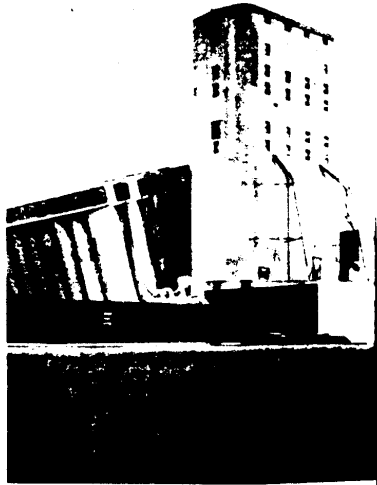


Figura 2.3. Falla general de una cimentación superficial



Figura 2.4. Daño en el muro de ladrillo debido a asentamiento de la cimentación

La primera sería una falla por capacidad de carga y la segunda se conoce como falla por asentamiento perjudicial. Estos dos tipos de fallas están relacionadas entre sí, pero para una manera práctica es muy conveniente estudiar su comportamiento separado, como si fueran causas independientes.

Tomando en cuenta que en un suelo siempre tenemos la presencia de agua en menor o mayor grado, al momento de aplicar una carga al suelo se produce un exceso de carga intersticial, puesto que el agua no resiste esfuerzos cortantes, esta presión se pierde mediante la salida del agua al exterior, dependiendo esto de la permeabilidad de la masa del suelo, llamándole a esto consolidación y manifestándose en la estructura por medio de asentamiento.

También, de acuerdo a como se pierde esta presión intersticial se incrementa la resistencia al corte, aumentando la capacidad de carga. Así tenemos que en un suelo granular como una arena, la permeabilidad es relativamente alta y por lo tanto, el asentamiento en la estructura se muestra al término de la construcción, caso contrario en las arcillas en donde tenemos permeabilidad baja y por eso la disipación de la presión intersticial es lenta, ocasionando que la estructura tarde varios años en asentarse después de, construida.

Cargas de proyecto. La selección de cargas en la que deba basarse el proyecto de cimentación influye en el tipo de cimentación y en la economía del proyecto, tomando en cuenta también que las condiciones del suelo influyen en la selección del tipo de cimentación. La carga admisible de una cimentación es aquella que se aplica sin producir problemas en la estructura, ésta no depende únicamente del terreno, sino también de la cimentación, del tipo de estructura y del coeficiente de seguridad.

Cada cimentación debe ser capaz de soportar con un margen de seguridad razonable (comúnmente se utiliza el factor 3) la carga máxima a la que vaya a estar sujeta, aún cuando nada más suceda en una sola ocasión y durante un breve tiempo.

Es importante que la estimación de carga muerta y carga viva sean lo más posible cercanas a la realidad y tomar en cuenta el tipo de suelo sobre el que se va a desplantar, para darle prioridad a la estimación de carga, así tenemos que en una arena la deformación es más rápida por cambio de esfuerzo y puede ser que la carga viva real no se aproxime a su valor estimado, mientras que la carga muerta real y la calculada deben ser casi iguales. Es así que los asentamientos de las zapatas en la arena ocurren más a la carga real máxima a la que están sujetas.

Por otra parte el asentamiento de una estructura apoyada en zapatas sobre una arcilla saturada es más lento y por lo tanto la estimación de carga debe ser lo más exacta posible, en cuanto a la carga muerta más la mejor estimación de la carga viva permanente.

Tipos de falla. Existen tres tipos clásicos de falla bajo las cimentaciones, falla por corte general, falla por punzonamiento y falla por corte local.

La *falla por corte general* sucede generalmente de una manera súbita y catastrófica y en ocasiones ocurre cierta rotación de la zapata, provocando un hinchamiento del suelo a los lados de la cimentación, aunque el colapso final se presenta en un solo lado, esto se debe a que se presenta dentro del terreno una superficie de desplazamiento continuo que se inicia en el borde de la cimentación y avanza a la superficie como se muestra en la figura 2.5.

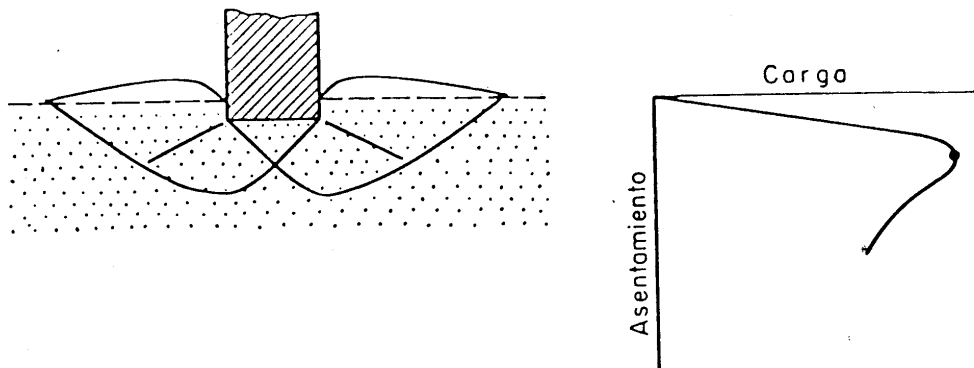


Figura 2.5. Falla de capacidad de carga por corte general y relación entre el asentamiento y la carga

La *falla por punzonamiento* se debe al movimiento vertical de la cimentación mediante la compresión del suelo que se halla inmediatamente debajo de ella, la falla se presenta por corte alrededor de la cimentación y casi no aparece deslizamiento alrededor de la zapata, manteniéndose en equilibrio tanto vertical como horizontalmente. A excepción de pequeños movimientos bruscos de la cimentación en sentido vertical, no se produce colapso visible ni inclinación sustancial. Es necesario para mantener un movimiento vertical que la carga tenga un movimiento continuo.

La *falla por corte local* tiene características tanto de falla por corte general como de punzonamiento y su forma se define claramente debajo de la cimentación, consistiendo en

una cuña y superficie de deslizamiento que inicia en el borde de la zapata, como sucede en la ruptura por corte general. También es marcada la tendencia al hinchamiento del suelo a los lados de la cimentación, por lo que la compresión vertical debajo de la cimentación es apreciable y la superficie de deslizamiento terminada en algún punto de la masa del suelo. Sólo en caso de algún desplazamiento vertical considerable de la cimentación puede ocurrir que éstas superficies lleguen a flor de tierra, pero aún en este caso no se produce una falla catastrófica ni inclinación de la zapata, la cual queda hondamente empotrada movilizandando a los estratos más profundos del suelo.

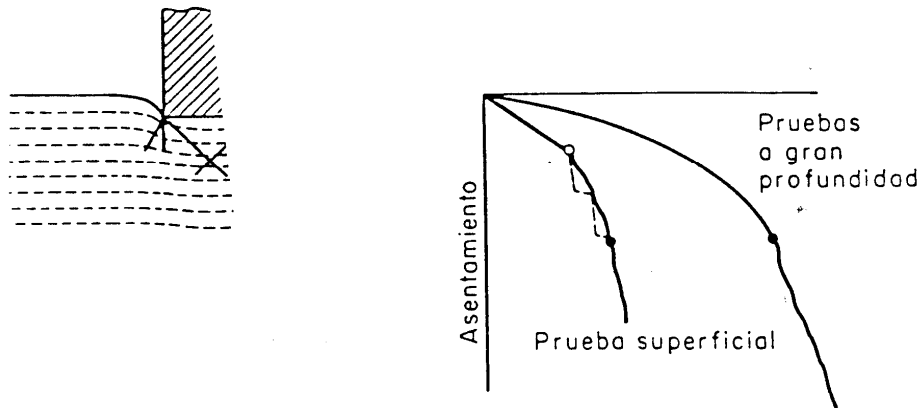


Figura 2.6. Falla q_u capacidad de carga por punzonamiento y relación entre el asentamiento y la carga

Asentamiento. Es prácticamente inevitable y al momento de que una estructura queda apoyada sobre un suelo sucede algún tipo de asentamiento, es por eso que es importante tomar en cuenta los siguientes principios:

- Generalmente en materiales como gravas, arenas gruesas y arenas medias alcanzan su máximo asiento al momento de aplicarles la carga y el hundimiento posterior no continúa presentándose, salvo un asentamiento pequeño sin importancia.

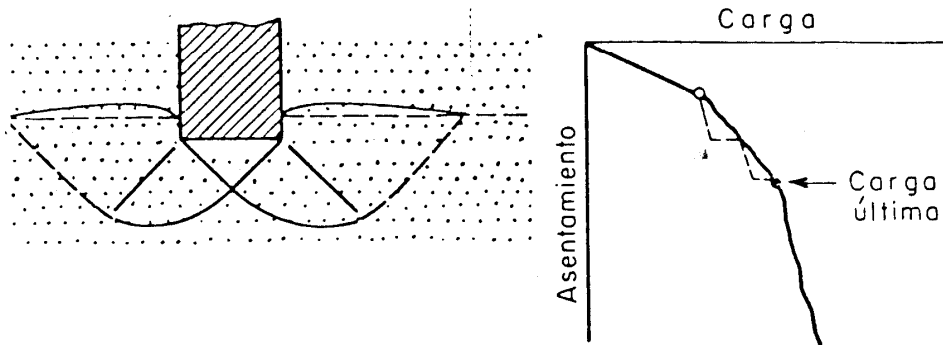


Figura 2.7. Falla de capacidad de carga por corte local y relación entre el asentamiento y la carga

- El limo y la arena fina se consolidan al momento de aplicar la carga, pero se pueden presentar asentamientos a los largo del tiempo, debido a que la carga desaloja contenidos de humedad, apareciendo asentamientos de importancia. En el caso en que la arena resulte ser muy movediza, el asentamiento que se produce puede ser desastroso cuando se trata de limo, ya que puede fluir lateralmente formando una ola de barro.
- Las arcillas alcanzan su consolidación al momento de aplicar la carga, pero como son plásticas generalmente continuarán su consolidación cada vez más lentamente durante un tiempo largo. Las arcillas pueden tener asentamientos además de los producidos por la presión, también por desecación, es decir, se puede ir asentando cada vez que se seca durante el verano, después se irá hinchando conforme absorba agua durante el período de lluvia, para evitar esto se recomienda desplantar la cimentación hasta una profundidad adecuada.
- El fango y el lodo orgánico son muy poco predecibles, sus asentamientos son demasiado peligrosos para soportar carga.

- Otro tipo de carga como las temporales (vientos, cargas móviles generadas por vehículos de tracción) es importante tomarlas en cuenta y en lugares grandes como almacenes, donde habrá permanentemente este tipo de cargas, se recomienda tomar en cuenta el 50% del valor de la carga móvil que se haya considerado en el proyecto.
- Por lo general lo que más preocupa es la diferencia de asentamientos en la estructura, más que el valor absoluto de los mismos. Si toda la superficie del suelo por debajo de la estructura cede de una manera general, sin perjudicar estructuras colindantes y sin ser el asentamiento mayor, por lo general pasará desapercibido, no así los asentamientos diferenciales, que aun siendo pequeños pueden ocasionar grietas.

2.2. SOLUCIÓN PARA CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Las ideas actuales sobre capacidad de carga se basan en trabajos originales desarrollados por Terzaghi, quien publicó en 1943 un documento de gran valor para la determinación teórica de la capacidad de carga. A partir de observaciones de pruebas de laboratorio y fallas a escala total, se descubrió que las superficies de falla por debajo de una superficie de apoyo tienen la forma mostrada en la figura 2.2. Para una simetría perfecta que incluya cargas axiales y un terreno homogéneo, las superficies de falla son también simétricas. A partir de estas premisas, Terzaghi analizó el problema como sigue.

Por debajo de una superficie lisa de longitud infinita (figura 2.8(a)), que soporta una carga cercana a la última, descansando sobre una superficie de suelo sin peso, hay una zona I en el *estado activo de Rankine* (cuando el suelo está cercano a la falla su peso es una fuerza perturbadora. En la condición pasiva, el peso es una fuerza que se resiste a la falla), una zona II de *cortante radial* y una zona III en el *estado pasivo de Rankine*.

Sin embargo, las bases de zapatas reales son rugosas, por lo que el suelo que se encuentra inmediatamente por debajo de la zapata está impedido por la fricción a pasar a un

estado activo, permaneciendo en el estado elástico (figura 2.8(b)). Sus deformaciones, por tanto, son pequeñas en comparación con las deformaciones plásticas de la zona II, y puede considerarse como parte componente de la misma zapata.

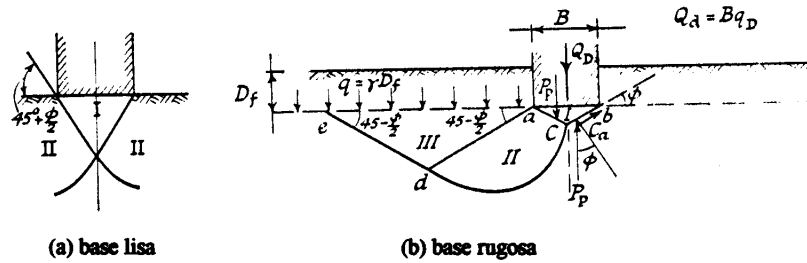


Figura 2.8. Superficies de falla idealizadas usadas en el análisis de Terzaghi

En el momento de la falla, una fuerza de $2P_p$, se opone al descenso de la zapata. Para simplificar el análisis, la resistencia al corte del suelo arriba del nivel de la base de la cimentación se desprecia, y su peso se considera solamente como una sobrecarga. Por ésta razón, el resultado del análisis no puede ser aplicado a zapatas cuya profundidad es mucho mayor que su ancho.

La suma de las fuerzas que conservan a la cuña en equilibrio es cero, por lo que:

$$Q_D + \frac{1}{4} \gamma B^2 \tan \phi - 2P_p - C_s \text{sen} \phi = 0 \dots\dots\dots(2.1)$$

(peso de la cuña) (cohesión)

O,

$$Q_D + \frac{1}{4} \gamma B^2 \tan \phi - 2P_p - Bc \tan \phi = 0 \dots\dots\dots(2.2)$$

En la cual Q_D es la fuerza total requerida para hacer que la zapata se hunda en el terreno y c es la cohesión por unidad de área. O sea,

$$Q_D = 2P_p + Bc \tan \phi - \frac{1}{4} \gamma B^2 \tan \phi \dots\dots\dots(2.3)$$

Con excepción de P_p , el resto de las cantidades que aparecen en la ecuación (2.3) son conocidas, de esta forma Q_D se puede determinar si previamente se calcula P_p . Si la zapata descansa sobre una superficie de suelo sin cohesión, entonces P_p puede determinarse rápidamente a partir de la teoría de Terzaghi. Esto conduce al resultado siguiente:

$$Q_D = Q_\gamma = B\gamma \frac{1}{2} B N_\gamma = \frac{1}{2} B^2 \gamma N_\gamma \dots\dots\dots(2.4)$$

En la cual, N_γ determinado con ayuda de la curva que aparece en la figura 2.9, es un número adimensional que depende sólo de ϕ .

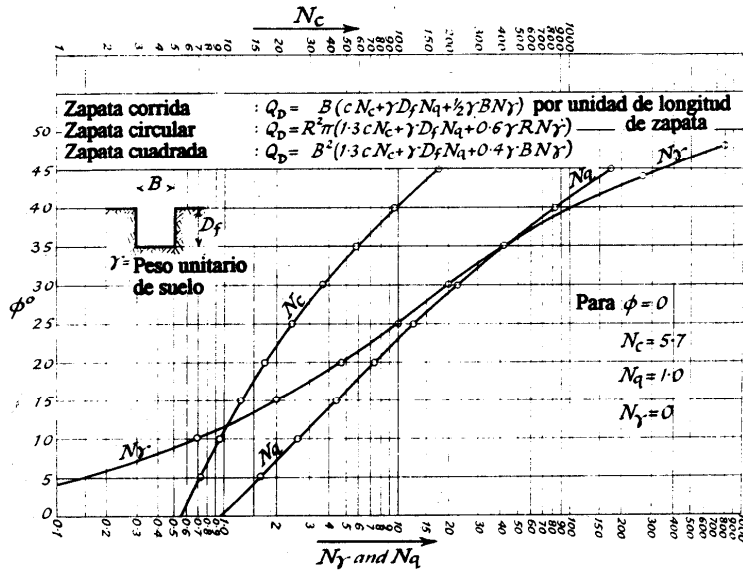


Figura 2.9. Factores de capacidad de carga propuestos por Terzaghi para cimentaciones superficiales (D_f menor que B)

Ahora, para una cimentación localizada a una cierta profundidad, en un suelo que posee tanto cohesión c como fricción ϕ , el problema se vuelve inmensamente más complicado. Si no se considera el peso del suelo (en una solución publicada por Prandtl en 1920, para la deformación plástica del acero sometido a un punzonado, el despreciar el peso del mate-