

LA MECÁNICA DE SUELOS Y LAS CIMENTACIONES EN LAS CONSTRUCCIONES INDUSTRIALES

Introducción

En estos apuntes se trata el *suelo* y el *terreno* como un elemento básico que participa de las construcciones en general, y que desarrollaremos especialmente aplicado a las Construcciones Industriales.

El *suelo o terreno* desde la selección de la implantación de la Industria hasta como soporte del Edificio industrial juega un papel determinante, bien como elemento estructural-soporte de lo que se le coloca encima, bien como material aprovechable para terraplenes y/o rellenos, bien incluso como material de construcción en diques, presas u otras obras de tierras comunes en nuestras Obras Industriales.

Luego es menester analizar el suelo, según el **uso** y/o **empleo** que del mismo hagamos en nuestra Obra.

A) **Como lugar de Implantación de la Industria**

El análisis de las características del *suelo y/o terreno* como lugar de implantación de un Complejos Industrial lo desarrollamos en la UD4 de estas Notas de Clases, y tiene como vertientes principales las topográficas, edafológicas, geológicas e hidrogeológicas.

B) **Como elemento soporte de las cimentaciones**

El análisis de las particularidades del suelo o terreno como elemento soporte de las diferentes tipos de cimentaciones de las Obras Industriales, es un estudio particularizado de su estructura y componentes físico-químicos y el comportamiento de estos ante las cimentaciones superficiales, profundas, con cargas estáticas o dinámicas aplicadas sobre el mismo.

C) Como elemento estructural

En toda obra de tierras y en especial en las de carácter industrial se realizan rellenos (terraplenes o pedraplenes); se hacen obras de sostenimiento o contención; se realizan excavaciones superficiales y subterráneas; se crean infraestructuras para las obras viales, propias o inducidas de la industria y en todas ellas el *suelo o terreno* juega un papel como elemento estructural.

D) Como producto

Es una manera de ver el *suelo o terreno* como material de construcción. De las Canteras de Prestamos o de las Canteras de Grava o Piedras nos abastecemos de los materiales fundamentales para nuestras Obras. Minas a cielo abiertas o subterráneas nos proporcionan de estos importantes componentes de la construcción industrial.

E) Como Acuífero

El *suelo o terreno*, es nuestra gran reserva de agua y en muchas ocasiones le mantenemos como grandes reservas acuíferas subterráneas o superficiales.

De todo ello se desprende que el suelo o terreno, no es sólo *un elemento portante o de soporte de las construcciones* sino que participa y aporta innumerables elementos aprovechables.

En este Capítulo, nos encargaremos fundamentalmente del suelo o terreno como elemento portante de las cimentaciones de las Construcciones Industriales.

EL SUELO COMO ELEMENTO PORTANTE DE LAS CIMENTACIONES

Las cargas que transmite la cimentación a las capas del terreno causan tensiones y por tanto, deformaciones en la capa del terreno soporte. Como en todos los materiales, la deformación depende de la tensión y de las propiedades del terreno soporte. Estas deformaciones tienen lugar siempre y su suma produce asentamientos de las superficies de contacto entre la cimentación y el terreno.

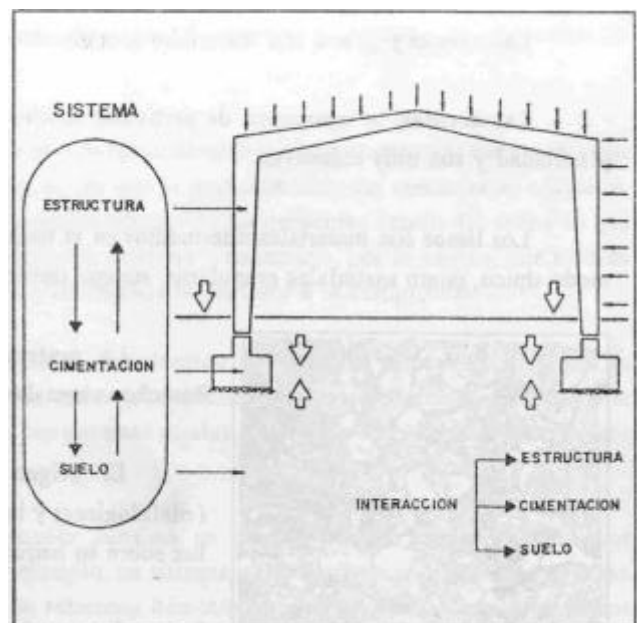
La conducta del terreno bajo tensión está afectada por su densidad y por las proporciones relativas de agua y aire que llenan sus huecos. Estas propiedades varían con el tiempo y dependen en cierto modo de otros muchos factores.

- * Variación del volumen de huecos como consecuencia de la *compactación del terreno*.
- * Variación del volumen de huecos como consecuencia del *desplazamiento de las partículas*.
- * Variación del volumen de huecos como consecuencia de la *deformación de las partículas del terreno*.

Los cimientos constituyen los subsistemas de cualquier edificación que transmiten directamente las cargas de esta hacia el suelo o terreno; su función es distribuir las cargas del edificio, dispersándolas en el suelo adyacente, de modo que éste y los materiales que los sostienen tengan suficiente fuerza y rigidez para soportarlas sin sufrir deformaciones excesivas.

Debido a las interacciones de suelos y cimientos, las características de los suelo o terrenos sobre los que se construye influyen de modo determinante en la selección del tipo y tamaño de los cimientos usados; estos últimos a su vez, afectan significativamente el diseño de la superestructura, el tiempo de construcción del edificio y, en consecuencia, los costos de la obra.

Por tanto, para lograr una edificación segura y económica es fundamental disponer de cierto conocimiento de la mecánica de suelos y del diseño de cimentaciones.



El estudio de los suelos, sus propiedades, y comportamiento, desde el punto de vista de la ingeniería civil, es el campo de la **Mecánica de Suelos**. En el presente capítulo se estudia la aplicación de la mecánica de suelo al diseño y la construcción de cimentaciones para edificaciones industriales.

Propiedades Físicas de los suelos o terrenos

Los geólogos definen los suelos o terrenos como rocas alteradas, mientras que los ingenieros prefieren definirlos como el material que sostiene o carga el edificio por su base.

Los materiales que están presentes en los suelos naturales se clasifican en cuatro tipos:

- arenas y grava,
- limos,
- arcillas
- materia orgánica.



Las **arenas y grava** son materiales granulares no plásticos.

Las **arcillas**, se componen de partículas mucho más pequeñas, exhiben propiedades de plasticidad y son muy cohesivas.

Los **limos** son materiales intermedios en el tamaño de sus partículas y se comportan, de modo típico, como materiales granulares, aunque pueden ser algo plásticos.

La **materia orgánica** consta principalmente de desechos vegetales.

El origen de las capas de suelo o terreno (edafológicas) y la forma como se depositan, arroja mucha luz sobre su naturaleza y variabilidad en el campo.

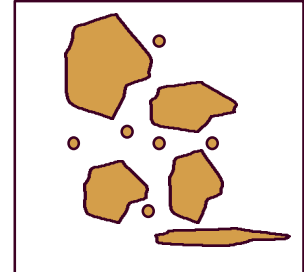
Los suelos son de dos orígenes: *residual* y *sedimentario*.

Los **suelos residuales** se forman in situ por la intemperización química de las rocas y, puesto que jamás han sido perturbados físicamente, conservan las características geológicas menores del material rocoso de origen. (En el campo, la transición de roca a suelo suele ser gradual.)

Los **suelos sedimentarios** son transportados y depositados por la acción de ríos, mares, glaciares y vientos. En general, el mecanismo de sedimentación regula la granulometría (tamaño de las partículas), sus variaciones, y la estratigrafía y uniformidad de las capas edafológicas.

Para la completa identificación de un suelo o terreno el ingeniero necesita saber lo siguiente:

- *tamaño*
- *granulometría*
- *forma*
- *orientación*
- *composición química de las partículas*
- *las fracciones coloidales y sedimentables que contiene.*



No obstante, *las propiedades físicas del suelo* pueden hacerse variar considerablemente mediante la incorporación de pequeñas cantidades de sustancias químicas la aplicación de métodos electroquímicos.

Cuando las propiedades superficiales de las partículas son importantes, las formas de éstas adquieren por lo menos la misma importancia que la granulometría. En condiciones normales, una característica significativa es la ubicación relativa de las partículas dentro del suelo, lo que determina la resistencia a los desplazamientos internos y constituye, por lo menos, una medida cualitativa de las fuerzas de resistencia a las fuerzas cortantes y a la compresión.

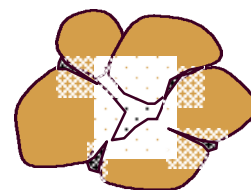
Se han realizado muchos intentos de clasificación de los suelo o terrenos con base en propiedades comunes e identificables. Sin embargo, conforme se ha ido acumulando información acerca de las propiedades de los suelos, los sistemas de clasificación se han tornado cada vez más elaborados y complejos.

Una de las principales dificultades consiste en que se quieren utilizar las mismas clasificaciones para distintos usos; por ejemplo, un sistema utilizable para el diseño de carreteras ya no es tan útil cuando el problema se relaciona básicamente con el diseño de cimentaciones para edificios industriales.

Un suelo o terreno cualquiera puede exhibir propiedades **sólidas, viscosas, plásticas o líquidas**; por tanto, cuando es posible predecir su verdadero estado físico, el diseño estructural de las cimentaciones se realiza tomando en cuenta esa información.

En contraste, los *sólidos* son materiales que tienen densidad, elasticidad y resistencia interna constantes, que se ven poco afectados por cambios normales de temperatura, variaciones en la humedad o vibraciones de intensidad inferior a los valores sísmicos.

La deformación por fuerzas cortantes ocurre a lo largo de dos conjuntos de planos paralelos, cuyo ángulo es constante para cada material e independiente de la naturaleza o intensidad de las fuerzas externas que inducen a la deformación.



Estas propiedades básicas de los sólidos sirven para el diseño de cimentaciones sólo mientras los suelos siguen siendo sólidos. Pero si los cambios en las condiciones modifican las estructuras del suelo, de modo que éstas ya no se comportan como sólidos, dichas propiedades se anulan y otro conjunto de reglas vienen a gobernar el nuevo estado físico. Casi todos los suelos se comportan como sólidos, aunque sólo dentro de un cierto límite de carga, el cual depende de muchos factores externos, como flujo de humedad, temperatura, vibraciones, edad del suelo y, en algunos casos, velocidad de carga.

No existe subdivisión evidente entre los **estados líquidos, plásticos y viscoso**. Estos tres estados de la materia tienen la propiedad común de que es muy difícil cambiar su volumen, aunque su forma cambia continuamente. Su diferencia estriba en la cantidad de fuerzas necesarias para comenzar su movimiento.

En el caso de los estados plástico y viscoso existe un valor mínimo necesario, pero en el caso de los líquidos, fuerzas prácticamente insignificantes ocasionan el movimiento.

Cuando la fuerza deja de ser aplicada, los materiales plásticos dejan de moverse, pero los de tipo viscoso y líquidos siguen moviéndose indefinidamente hasta que entran en juego fuerzas contrarrestantes.

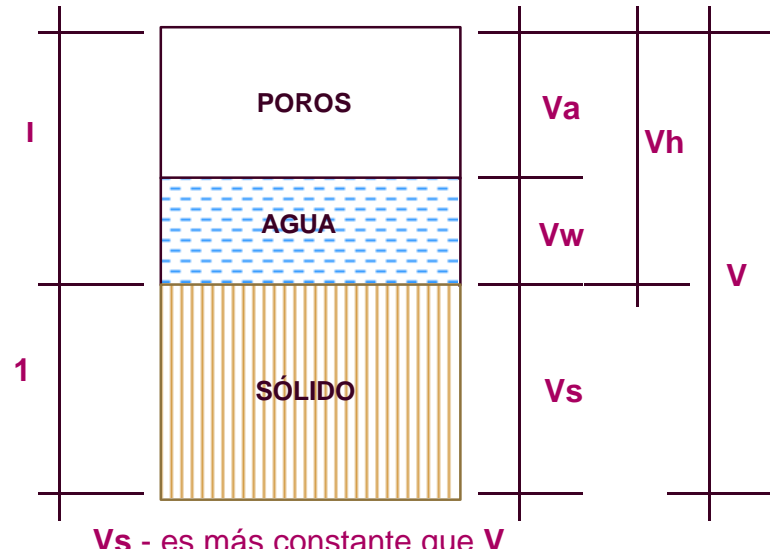
En general, la división entre los estados sólido y plástico depende del porcentaje de humedad del suelo.

Dicho porcentaje, sin embargo, no es una constante, sino que disminuye al aumentar la presión a que está sometido el material. Por tanto, en los suelos anegados, la posibilidad de evitar desplazamientos o pérdidas de agua se traduce en la eliminación de problemas por cambio de volumen o por asentamiento.

Humedad del suelo

El agua suele estar presente en los suelos o terrenos en forma de una delgada capa absorbida a la superficie de las partículas o como líquido libre entre éstas.

Si el contenido de agua de un suelo está principalmente en forma de capa, o humedad absorbida, entonces no se comporta como líquido. Todos los sólidos tienden a absorber o condensar en su superficie cualquier líquido (y gas) que entra en contacto con ellos.



El tipo de ión, o de elemento metálico, presente en la composición química de un sólido, influye considerablemente en la cantidad de agua que éste pueda absorber. Por tanto, los procedimientos de intercambio iónico para la estabilización de los suelos y el control de la percolación forman parte importante de la mecánica de suelo.

Las capas delgadas de agua son más fuertes que el agua de poros. En 1920, Terzaghi estableció que las películas de agua de menos de 5.04×10^{-5} mm de espesor se comportan como semi-sólidos; no hierven ni se congelan a temperaturas normales.

En consecuencia con lo anterior, los suelos o terrenos saturados se congelan con más facilidad que los suelos anegados, y los cristales de hielo crecen al tomar humedad libre de los poros. Luego un deshielo repentino libera grandes cantidades de agua, lo que suele tener drásticos resultados. Cuando los líquidos se evaporan, lo primero que hacen es formar capas, por lo que se requiere un considerable aumento térmico para efectuar el cambio de estado entre la película líquida y el vapor. Por consiguiente, el efecto de temperatura sobre el estado físico del suelo se explica en términos de la reducción del espesor de las capas de líquido al elevarse dicha temperatura.

La presencia de humedad en el suelo o terreno es fundamental para controlar la

compactación. La mejor manera de efectuar la compactación de suelos, sea por medios artificiales o naturales, es bajo condiciones de humedad bastante definidas, ya que la redistribución de las partículas del suelo para que ocupen un menor volumen no es posible cuando se carece de suficiente humedad para cubrir cada gránulo. La película de agua hace las veces de lubricante, lo que facilita los movimientos relativos de las partículas, y su tensión capilar las sostiene en su sitio. Desde luego, si los granos son de menor diámetro se necesita más agua a fin de lograr mejor estabilización que en el caso de partículas más gruesas.

Resistencia de los suelos a la presión

Ya desde antes de 1640, Galileo señaló la diferencia entre sólidos, semi-líquidos y líquidos.

Este naturalista aseveraba que los semi-líquidos, a diferencia de los líquidos mantienen su forma cuando se les apila, y que, si se les hace un hueco o cavidad en la superficie, la agitación hace que se rellene el hueco, mientras que en los sólidos, la cavidad no se rellena. Esta es una descripción muy burda de la propiedad llamada pendiente natural de los materiales granulares, una propiedad muy fácil de observar en arenas limpias y secas, aunque los suelos o terrenos con diversas cantidades de arcilla y humedad tienen diferentes pendientes. Es importante no confundir el ángulo de reposo natural con el ángulo de fricción interna, aunque muchos autores han seguido a Woltmann, quien, al traducir los escritos de Coulomb, cometió ese error.

Fue Coulomb (1773) quien aplicó a los suelos las leyes fundamentales de la fricción. Él descubrió que la resistencia a lo largo de una superficie de falla dentro de un suelo es función tanto de la carga por unidad de área como de la superficie de contacto. Puede considerarse como la primera contribución importante a la Mecánica de Suelos.

La resistencia de los suelos a la deformación depende, sobre todo, de su resistencia a la fuerza cortante. Esta resistencia equivale, a su vez, a la suma de dos componentes: *fricción y cohesión*.

La resistencia friccional surge de la irregularidad de los contactos entre partículas y es proporcional a la fuerza perpendicular entre ellas. La cohesión que es la resistencia máxima a la tensión de un suelo, es resultado de las fuerzas de atracción que hay entre gránulos en contacto íntimo y no depende de la presión normal. Sin embargo es muy raro encontrar esta cohesión verdadera; lo más común es que los suelos tengan cierta resistencia friccional.

PROPIEDADES DEL SUELO IMPORTANTES EN INGENIERÍA

Las propiedades edafológicas normalmente muy importantes son las que se exponen a continuación.

Densidad:

La cantidad de materia sólida presente por unidad de volumen recibe el nombre de **densidad en seco del material**. En el caso de los suelos granulares y orgánico-fibrosos, la densidad en seco es el factor más importante desde el punto de vista de sus propiedades ingenieriles. Una de esas propiedades es el estado o grado de compactación, que se expresa generalmente en términos de densidad relativa, o razón (como porcentaje) de la diferencia entre la densidad del suelo natural en seco y su densidad en seco mínima, dividida entre la diferencia que hay en sus densidades máxima y mínima en seco.

Sin embargo, durante la construcción de rellenos ingenieriles, el grado de compactación suele especificarse como el cociente de densidad real en seco, in situ, dividida entre la densidad máxima en seco, determinada con una prueba de laboratorio diseñada para el cálculo de la relación humedad-densidad (**ASTM D1557 o D698**).

Fricción Interna:

La fricción pura de Coulomb equivale a la simple resistencia a la fuerza cortante en la teoría de la elasticidad. La fricción interna suele expresarse geométricamente como el ángulo de fricción interna ϕ (phi), donde $\tan \phi = f$, el coeficiente de fricción. Entonces la componente friccional de la resistencia a la cortante, T_{\max} de una masa de suelo, equivale a $N \tan \phi$, donde N es la fuerza perpendicular que actúa sobre dicha masa.

Los valores de ϕ (phi) van desde unos **28°** en el caso de arenas sueltas y limos no plásticos, hasta unos **48°** en el de arenas sueltas y gravillas. El valor aumenta junto con la densidad, la angularidad y la granulometría de las partículas; disminuye cuando el suelo contiene mica; es relativamente indiferente a la velocidad de carga y el tamaño de las partículas; y puede aumentar o disminuir bajo cargas repetitivas o cíclicas.

Muchos ingenieros utilizan el valor de T_{\max} como equivalente de la resistencia total a la fuerza cortante (suposición que también se hace en casi todas las ecuaciones para el cálculo de la presión en suelo o terrenos).

Cohesión:

Es la máxima resistencia del suelo a la tensión. Resulta de la compleja interacción de muchos factores, como la adherencia coloidal de la superficie de las partículas, la tensión capilar de las películas de agua, la atracción electrostática de las superficies cargadas, las condiciones de drenaje y el historial de esfuerzos. Sólo existe verdaderamente cohesión en el caso de arcillas que tienen contacto de canto con cara entre sus partículas. Los suelos o terrenos no plásticos de grano fino pueden exhibir una cohesión aparente cuando están en condiciones de saturación parcial.

El valor de cohesión que se utiliza al diseñar depende directamente de las condiciones de drenaje bajo la carga impuesta, así como del método de prueba que se emplee para calcularlo, por lo que todo se debe evaluar cuidadosamente.

Compresibilidad:

Esta propiedad define las características de esfuerzo-deformación del suelo. La aplicación de esfuerzos agregados a una masa de suelo origina cambios de volumen y desplazamientos.

Estos desplazamientos, cuando ocurren a nivel de la cimentación, provocan asentamientos en ella. La limitación de los asentamientos a ciertos valores permisibles suele regir el diseño de las cimentaciones, sobre todo cuando los suelos o terrenos son granulares.

En el caso de los suelos granulares, la compresibilidad se expresa en términos del **módulo de Young E**, el cual suele considerarse equivalente al módulo secante de la curva de esfuerzo-deformación, obtenida por medio de una prueba triaxial estándar. El módulo disminuye al aumentar el esfuerzo axial, pero se incrementa al elevar la presión de confinamiento y al someter la muestra a cargas repetitivas.

La compresibilidad de las arcillas saturadas se expresa como el **índice de compresión C_c** , junto con una evaluación de la máxima presión a la que hayan sido sometidos antes.

Ambos valores se calculan por medio de pruebas de laboratorios unidimensionales estándar de consolidación (**ASTM D2435**). C_c representa el cambio en la proporción de vacíos por ciclo logarítmico de esfuerzo y es una función del historial de esfuerzos del terreno. Para fines prácticos, es necesario saber el valor dentro de los límites específicos de esfuerzos que se desea manejar.

Permeabilidad:

Es la capacidad de una masa de suelo o terreno de permitir el flujo de líquidos a través de un gradiente hidráulico. En el diseño de cimentaciones, por lo general lo único que es necesario saber es la permeabilidad en condiciones de saturación. Las permeabilidades de casi todos los tipos de suelo son muy variables y dependen en gran medida de variaciones relativamente pequeñas de la masa edafológica.

Puesto que generalmente depende del tamaño y la continuidad del espacio poroso del suelo y, en consecuencia, del tamaño de las partículas de éste, la permeabilidad es típicamente una propiedad anisotrópica cuyo valor es más alto en la dirección horizontal que en la vertical.

Los valores de permeabilidad de las distintas clasificaciones del suelo o terreno varían por un factor de más de 10 millones, lo que se ha constatado directamente por medio de pruebas de permeabilidad en el campo o en el laboratorio, e indirectamente por pruebas de consolidación y análisis del tamaño de las partículas. Las mejores cuantificaciones se obtienen con pruebas de bombeo en pozos a cielo abierto en el campo.

**Otras propiedades:**

Existen algunas otras propiedades menores de los suelo o terrenos que, en ciertos casos, adquieren relevancia.

Por ejemplo, el **contenido de materia orgánica del suelo** puede afectar la fijeza de cualquiera de las propiedades inducidas por tratamiento. Así los suelos muy ricos en materia vegetal descompuesta, que contienen ácidos tánicos, no son adecuados para la estabilización con cemento.

A modo de ejemplo, los suelo o terrenos con un alto contenido de polvo de caliza se debilitan con el flujo de agua a través del suelo o se desintegran con la percolación de aguas de albañal o algunos otros líquidos residuales.

IDENTIFICACIÓN, MUESTREO Y EVALUACIÓN DE SUELOS

Para facilitar la aplicación de la experiencia previa al estudio de las condiciones nuevas del suelo, es necesario disponer de un sistema estándar de identificación de suelos o terrenos. Con ese fin, la clasificación de estos se basa generalmente en propiedades físicas que se evalúan según procedimientos normalizados. Las pruebas de evaluación de las propiedades de los suelos o de sus reacciones ante cargas constan de procedimientos de laboratorio y campo.

Identificación de suelos

Las investigaciones de campo para la identificación de suelo o terrenos se pueden hacer por medio de levantamientos superficiales, estudios aéreos o análisis exploratorios geofísicos o superficiales. El conocimiento completo de la estructura geológica de un área permite hacer una identificación definida a partir de la inspección superficial. Junto con una clasificación mineralógica de las capas más externas, la inspección permite cuando menos identificar la estructura de ciertos suelos. Sin embargo, no basta para conocer el comportamiento del suelo, a menos que se hayan encontrado previamente condiciones idénticas.

En casi todos los países existen mapas geológicos y/o agronómicos del suelo o terreno, junto con informes detallados, que son bastante útiles para este fin.

En Estados Unidos, por ejemplo, dichos mapas son publicados por el U.S. Department of Agriculture, U.S. Geological Survey y sus correspondientes oficinas estatales. En España los edita el Instituto Geográfico Nacional, Instituto Geológico y Minero, y el Ministerio de Agricultura. Los levantamientos viejos tienen gran valor para la localización de las líneas originales de playas y arroyos, así como para conocer la existencia de cambios superficiales.



Para grandes Obras, se precisa o detallan los mapas existentes y/o en dependencia de la magnitud de la Obra se confeccionan específicamente para ella. En el Anexo... se muestra un ejemplo del editado por el **M.O.P.T.** para la construcción de la línea del AVE en el tramo Getafe-Córdoba.

Es necesaria una inspección completa del sitio de obra a fin de complementar los

datos obtenidos a partir de mapas y levantamientos, y en la mayor parte de los casos ayudará también a aclarar las cuestiones de uniformidad. Además, la inspección de las estructuras vecinas servirá para destacar algunas de las posibles dificultades.

La inspección aerofotogramétrica se ha desarrollado hasta el punto en que es factible hacer una rápida evaluación de los suelos, a muy bajo costo en grandes áreas.

Los datos que se obtienen mediante fotografías aéreas estereoscópicas, obtenidas de vuelos propios y/o de satélites, correlacionadas con patrones normalizados, permiten identificar los tipos de suelos o terrenos en base a su color, textura, características de drenaje y cubierta vegetal.

Clasificación de los suelos:

El sistema de clasificación de suelos más aceptado es la *Unifield Soil Classification* (**Clasificación Unificada de Suelos**) que se presenta en la Tabla... En ella se encuentran criterios definidos para la nomenclatura de los suelos y una lista en la que éstos se agrupan dentro de divisiones fijas conforme al tamaño de sus partículas y a los resultados de prueba de laboratorio acerca de sus características físicas.

Exploración Sub-superficial

Esta es la **fase de campo** del análisis de suelos o terrenos y del diseño de sub-estructuras, por lo que es muy importante.

La obtención de información inadecuada, imprecisa o errónea en esta fase del trabajo es la causa más común de que se produzcan diseños excesivamente costosos de excavación y cimentación, que además quedan expuestos a fallas. Por tanto, la palabra clave es: **exploración**. La finalidad de este trabajo es esclarecer, mediante técnicas exploratorias, la naturaleza de las condiciones sub-superficiales del sitio de obra correspondiente y su impacto sobre el diseño. Por consiguiente, el trabajo se debe planificar y ejecutar de modo que revele la naturaleza de los suelos, y no se debe realizar como un simple procedimiento rutinario. Así el tipo y magnitud de las técnicas de exploración, de las pruebas *in situ* y de los métodos de muestreo se deben elegir con base en las incógnitas asociadas al terreno, los peligros geológicos que cabe esperar razonablemente, la carga que va a imponer la estructura por construir y el grado de asentamientos que puede tolerar la edificación ya terminada.

La intensidad y metodología del trabajo exploratorio varían mucho (no existe ningún método estándar aplicable a todos los casos, y no conviene imponerlo).

En zonas bastante urbanizadas, donde las condiciones superficiales y características

ingenieriles del terreno ya se conocen bastante bien gracias a trabajos previamente realizados en otras estructuras, una investigación apropiada podría consistir en hacer un trabajo pequeño de confirmación de datos, incluso cuando la estructura en un proceso de diseño sea una edificación grande.

Por el contrario, cuando se va a implantar una estructura ligera en una región aislada, con malas condiciones sub-superficiales, conviene realizar una investigación exhaustiva. Algunos reglamentos de construcción exigen programa de exploración del suelo; sin embargo, no se debe olvidar que sólo se trata de los criterios mínimos. Por tanto, el pliego literal a dichas exigencias no constituyen una práctica ingenieril prudente. La mejor norma es: el ingeniero de cimentación debe estar razonablemente seguro de que no quedan **incógnitas de importancia** respecto al terreno, y debe conocer cuáles son las características más determinantes de los materiales del subsuelo.

Conforme a esta filosofía profesional general, a menudo es recomendable hacer investigaciones subsuperficiales en dos o más fases, cada una de las cuales aportan un número mayor de detalles. Se puede comenzar por unos cuantos barrenos o algún otro tipo de exploración en la que se manejen inter-espacios grandes. A partir de estas técnicas se pueden establecer la estratigrafía y propiedades generales del suelo o terreno. Luego se planifica una segunda fase, cuya finalidad es llenar los huecos que dejó la primera, confirmar la uniformidad o predecibilidad del terreno y delinear y definir cualquier anomalía. En una tercera fase de detalle sólo se acabará de definir las anomalías o se realizarán las pruebas especiales impuestas por los problemas específicos de la edificación que se está diseñando.



Técnicas de detección remotas

Estos métodos aportan pruebas indirectas de la naturaleza de los minerales del subsuelo. No indican de modo directo las propiedades ingenieriles del terreno, pero sí permiten conocer las profundidades de los estratos en muchos casos, así como hacer evaluaciones cualitativas de los materiales.

Las inspecciones aéreas son muy apropiadas cuando es necesario explorar grandes extensiones. Ver Tabla... *Clasificación Unificada de Suelos*, incluyendo datos de identificación y descripciones. El análisis de fotografías aéreas estereoscópicas ordinarias, fotografías infrarrojas térmicas y de colores falsos, fotografías multiespectrales de satélite o imágenes de radar aéreo de soslayo puede revelar la topografía y drenaje superficial de los terrenos, las características lineales que reflejan la estructura geológicas de éstos, su tipo de suelo superficial y, a menudo, el tipo de roca subyacente.

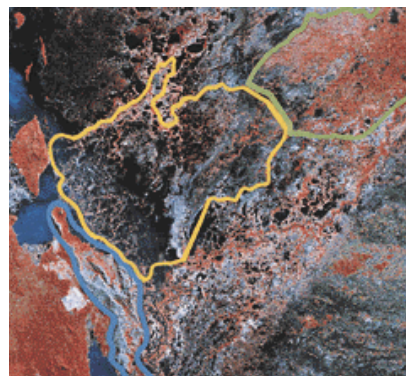
GRUPOS PRINCIPALES			SÍMBOLO GRÁFICO	DESCRIPCIÓN DEL SUELO Y SIMBOLO DE LETRAS
SUELOS DE GRANO GRUESO	GRAVA Y SUELOS CON GRAVA	GRAVA LIMPIA		GW- GRAVAS BIEN GRADUADAS, MEZCLAS DE GRAVA Y DE ARENA, CON POCOS FINOS O SIN FINOS
		GRAVA CON FINOS		GP- GRAVAS MAL GRADUADAS, MEZCLAS DE GRAVA Y DE ARENA, CON POCOS FINOS O SIN FINOS
	MAS DEL 50% DE LA FRACCION GUESA QUEDA RETENIDA POR EL TAMIZ N°4	(FINOS EN CANTIDAD APRECIA-BLE)		GM- GRAVAS LIMOSAS, MEZCLAS DE GRAVA - ARENA - LIMO
			GC- GRAVAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE GRAVA - ARENA - ARCILLA	
MAS DEL 50% DEL MATERIAL QUEDA RETENI-DO POR EL TAMIZ N°200	ARENA Y SUELOS ARCILLOSOS	ARENA LIMPIA		SW- ARENAS BIEN GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN FINOS
		ARENA CON FINOS		SP- ARENAS MAL GRADUADAS, ARENAS CON GRAVA, CON POCOS FINOS O SIN FINOS
	MAS DEL 50% DE LA FRACCION GUESA PASA POR EL TAMIZ N°4	(FINOS EN CANTIDAD APRECIA-BLE)		SM- ARENAS LIMOSAS, MEZCLAS DE ARENA - LIMO
			SC- ARENAS ARCILLOSAS, MEZCLAS DE ARENA - ARCILLA	
SUELOS DE GRANO FINO	LIMO Y ARCILLA			ML- LIMOS INORGANICOS Y ARENAS MUY FINA, POCO DE ECTA, ARENAS FINAS LIMOSAS ARCILLOSAS, LIMOS ARCILLOSOS POCO PLASTICOS
				CL- ARCILLAS INORGANICAS POCO PLASTICAS O DE PLASTICIDAD MEDIANA, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARCILLOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS GRASAS
	LIMITE LIQUIDO MENOR DE 50			OL- LIMOS ORGANICOS Y ARCILLAS LIMOSAS ORGANICAS POCO PLASTICAS
	LIMOS Y ARCILLA			MH- LIMOS INORGANICOS, CON MICA O SUELOS FINA DE DIATOMEAS O SUELOS LIMOSOS
				CH- ARCILLAS INORGANICAS MUY PLASTICAS, ARCILLAS GRASAS
	MAS DEL 50% DEL MATERIAL PASA POR EL TAMIZ N°200	LIMITE LIQUIDO MAYOR DE 50		
SUELOS MUY ORGANICOS				PT- TURBA, HUMUS, SUELOS DE PAU- NOS CON MUCHA MATERIA ORGA- NICA

Estas técnicas son particularmente útiles para localizar sumideros rellenos en regiones de tipo **karst**, donde estos pueden estar muy próximos entre sí.

La exploración geofísica aporta gran información muy rápidamente y es muy económica como manera de complementar los datos obtenidos mediante barrenos o perforaciones exploratorias. Las técnicas geofísicas incluyen reflexión y refracción sísmica, pruebas sísmicas de tiro y galería, resistividad eléctrica, cuantificaciones microgravimétricas y elaboración de perfiles acústicos del subsuelo.

La exploración sísmica de los subsuelos es resultado secundario de las prácticas estandarizadas de exploración petrolera para la detección de discontinuidades en la estructura del suelo. Los principios que entran en juego son las conocidas características de transmisión, reflexión y refracción de las ondas sonoras al pasar a través de materiales con distintas densidades. El método consiste en registrar el tiempo que tardan las ondas sonoras inducidas por explosiones o golpes de martillo en llegar a diversos puntos del terreno.

En una técnica parecida, se utiliza la variación en la conductividad eléctrica de las diversas densidades del suelo y de las discontinuidades de contacto de las capas. Para el método microgravimétrico se utilizan pequeñísimas variaciones en el campo de gravedad, lo que permite ubicar huecos subsuperficiales o cambios en el tipo de roca. La elaboración de perfiles del subsuelo se emplean en estudios marinos para obtener un registro continuo, a partir de la reflexión sísmica, de los contactos estratigráficos del subsuelo marino.



En muchos casos, los métodos geofísicos permiten obtener un buen cuadro de propiedades del suelo o terreno, profundidad de las capas y profundidad hasta la roca subyacente. Sin embargo, no cabe esperar que produzcan más que un cuadro promedio o estadísticos de las condiciones, o que permitan más que una identificación aproximada de los tipos de suelos. No obstante la información que se obtiene de ellos es una guía excelente para programar una investigación exploratoria completa y puede ser inapreciable para deducir la información correspondiente al terreno ubicado entre barrenos muy distantes entre sí.

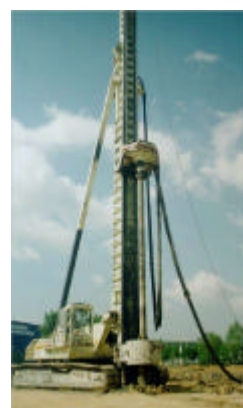
Exploración in situ y técnicas de prueba

Existe una amplia variedad de técnicas para la investigación **in situ** de las condiciones subsuperficiales del suelo.

Algunos de esos métodos se han estandarizado y muchos de ellos se utilizan en todo el mundo.

a) Pozos y zanjas de prueba a cielo abierto

Estos métodos permiten hacer una observación visual directa y posibilitan la toma manual de muestras del suelo, aunque están limitados a profundidades prácticas de 3 ó 4 m. Las zanjas son útiles para ubicar los puntos de contacto con estratos que se profundizan agudamente.



Los pozos de prueba son un medio rápido y económico de obtener información del subsuelo, pero no se deben utilizar por separado, a menos que se conozcan los materiales que hay por debajo del pozo o cuando esta información no tiene importancia. Los suelos descubiertos con los pozos o zanjas a cielo abierto se muestrean fácilmente clavando a mano tubos de pared delgada en el fondo o los taludes de la excavación.

b) Sondas

Se trata de sondas taladradas o clavadas, sin toma de muestras, cuya finalidad es localizar la roca madre y obtener cortes destinados a la identificación del suelo o terreno. Las sondas clavadas permiten evaluar adecuadamente las propiedades del suelo. Las sondas para la localización de la roca madre también aportan información sobre la solidez relativa de ésta, lo que se mide a partir de la velocidad de penetración de la barrena cuando ésta es sometida a una presión descendente constante.

c) Perforaciones

El método tradicional de exploración del subsuelo consiste en perforar (taladrar) y examinar agujeros y el material que de ellos se extrae. Sin embargo muchos de los problemas de construcción de cimientos, que a menudo son muy costosos, resultan del uso de métodos inapropiado de muestreo por horadación o de una confianza excesiva en la extrapolación de los resultados. En consecuencia, para la planificación y ejecución de las exploraciones del suelo o terreno mediante perforaciones se debe recurrir a una evaluación ingenieril experta.

Sólo cabe esperar que una perforación permita conocer a ciencia cierta las condiciones que prevalecen en el sitio en que ésta se práctica. En consecuencia, la información así obtenida puede ser representativa o no de las condiciones que prevalecen entre una perforación y otra. Por tanto el número y ubicación de las horadaciones requieren una buena experiencia y juiciosa evaluación.

En muchos reglamentos municipales y estatales de construcción se especifican un número mínimo de perforaciones para cada tamaño de terreno. La información así obtenida, sin embargo, puede ser insuficiente para el diseño y la construcción de los cimientos. Muy a menudo, después de haber realizado las perforaciones que exigen los reglamentos, se retira del sitio el equipo de perforación; luego, durante la excavación o construcción de los cimientos, se descubren capas de discontinuidad en el sitio.

Cuando ya se está en esa fase de la construcción, el costo de nuevas perforaciones es muy elevado; no obstante, es necesario hacerlas.

Sin excepción, el costo de esta exploración representa apenas una pequeña parte del desperdicio que representaría, de otro modo, el sobrefuerzo de la cimentación para compensar la falta de información, o las revisiones de corrección que serían necesarias durante la construcción de los cimientos de la industria.

La estrategia más usual para realizar las perforaciones complementarias es elegir el punto intermedio de la distancia entre las perforaciones previas que arrojan resultados diferentes. Luego si la nueva perforación no representa un promedio razonable de las dos previas, se efectúa otra perforación entre el par que tiene la mayor discrepancia. Según sean los resultados, es probable que se necesiten más perforaciones. De esta manera se puede precisar razonablemente la ubicación de los cambios encontrados en las condiciones del terreno y se elimina la necesidad de hacer exageraciones innecesarias en la cimentación.

Las perforaciones se ejecutan por medio de extensiones para barrenas rotatorias. Durante la perforación se utiliza un líquido circulante cuya función es retirar el material desprendido. A fin de evitar la contaminación de las muestras de suelo que se toman con la barrena, en general conviene usar el método de perforación con taladro giratorio y lodo bentonítico como líquido circulante.

Independientemente del método al que se recurra, se debe tener mucho cuidado para que el nivel del líquido dentro del agujero jamás sea inferior al nivel del manto freático, incluso durante el intervalo en que se están retirando de la perforación los implementos de la barrena.

Durante la perforación y el muestreo de perforaciones, es necesario que un ingeniero, geólogo o técnico capacitado lleve una bitácora. (Ver Fig..... *Bitácora de perforación de suelos*) en la que anote las profundidades de perforación a que se toman muestras o realizan pruebas, las profundidades donde ocurren cambios de estratos y la profundidad del manto freático; además conviene anotar también los resultados de cualquier prueba realizada **in situ**, como la prueba estándar de penetración (**ASTM D 1586**).



Por otra parte, las bitácoras deben mantener una descripción completa de todos los materiales encontrados o detectados en las escorias y muestras.

Cuando la barrena topa con rocas, en la bitácora se anota el tipo de material extraído, haciendo referencia a la longitud y porcentaje de la distancia perforada en la roca; cualquier filón intemperizado o interrupción en el material del suelo; y cualquier fractura y su inclinación. En el caso de muchas formaciones rocosas, la evaluación de la designación de calidad de la roca (**RQD**; del inglés *rock quality designation*) y su anotación en la bitácora son un buen indicador de la solidez del estrato rocoso.



Las perforaciones son un método que permite muestrear los subsuelos y hacer pruebas al mismo tiempo. La prueba más común en perforaciones es la prueba estándar en penetración (**SPT** del inglés *Standard Penetration Test*) (**ASTM D 1586**). En dicha prueba, se clava en el fondo de la perforación, mediante golpes con una masa de **63 kg** (140 lbs) que se deja caer desde una altura de **75 cm**, un muestreador de barril hendido, o cuchara, de **5 cm** (2 pulg) de diámetro externo. Se registra el número de golpes necesarios para incrustar **30 cm** (12 pulg) la cuchara, y esa cifra recibe el nombre de valor **N** en golpes/pie. **N** es un indicador de la densidad de los suelos granulares y puede reflejar la resistencia de las arcillas no moldeables.

En la Tabla siguiente se muestran valores de **N** para suelos clasificados como *pobres* y por lo tanto de inaceptable aplicación en cimentaciones.

Tipos de Suelos	Valor de N
<i>Suelos Orgánicos</i>	< 4
<i>Suelos Arcillosos</i>	< 4
<i>Suelos Arenosos</i>	< 10

La **STP** (Standard Penetration Test) da por resultado muestras moderadamente alteradas, pero aceptables para la observación, clasificación y evaluación conforme a índices. Sin embargo el número de golpes está sujeto a muchas influencias durante la perforación y muestreo, así como a ciertos factores de los materiales penetrados. Por tanto, **N** es una medida que se debe evaluar muy cuidadosamente. Para más detalles véase la referencia Bibliográfica



Penetrometro dinámico

Otros medios de prueba en perforaciones son **la cizalla de espas**, que sirve para medir in situ la resistencia de las arcillas y los suelos orgánicos a la fuerza cortante, y el manómetro, en el que una membrana vertical expansible, colocada dentro de una perforación, mide la rigidez y la resistencia del suelo circundante.

Los aparatos de muestreo de suelos y rocas se deben elegir con cuidado para optimizar la colección de material y reducir al mínimo las alteraciones en la muestra. Las rocas macizas y no intemperizadas se muestrean generalmente con barrenas giratorias con brocas de diamante. Estas existen en varios tamaños, desde las **AX** hasta las de 10 cm (4.5 pulg) de diámetro externo. La broca **NX** es la de uso más frecuente, aunque las de mayor tamaño extraen más material cuando las rocas están intemperizadas, fracturadas o porosas.

También mejora la cantidad de material obtenido cuando se usan barrenas de varios tubos. En la figura se presenta una bitácora como ejemplo del trabajo de perforación de roca.

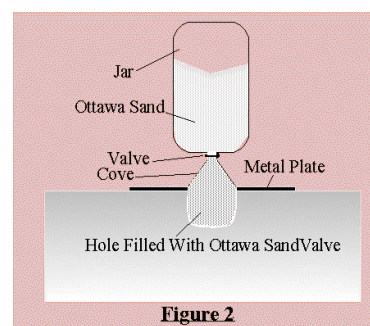
La barrena **STP** es un muestreador relativamente bueno para la mayor parte de los suelos, aunque la muestra exhibe alteraciones moderadas. En el caso de los suelo o terrenos arcillosos de consistencia firme a dura, se obtienen muestras relativamente intactas mediante el uso de tubos de **Shelby**, de pared delgada, introducido con mecanismos hidráulicos. Cuando los suelo o terrenos son arcillosos blandos o arenosos sueltos, un muestreador de pistón da mejores resultados. Los suelo o terrenos densos y las rocas muy intemperizadas se pueden muestrear con los muestreadores Tipo **Dennison o Pitcher**.

El sondeo con un penetrómetro cónico es una técnica completamente eficaz cuando se usa en combinación con muestreos por perforación. En el cono holandés impulsado hidráulica o mecánicamente se utiliza una punta cónica para medir la resistencia a la penetración; detrás de esa punta va una manga o camisa, con la que se mide la resistencia por fricción. Estos dos valores son buenos indicadores de la resistencia y rigidez del suelo, por lo que son índices relativamente confiables del tipo de suelo de que se trata.

Los penetrómetros cónicos también se impulsan dinámicamente con una masa como se hace con el **STP**. Así obtenidos, los resultados de la prueba son análogos a la cuenta de golpes de la **STP** y sirven para los mismos fines aplicando las correcciones apropiadas.

Pruebas de laboratorio

Básicamente, las pruebas de laboratorio generan datos más exactos sobre las propiedades ingenieriles del suelo o terreno que las interpretaciones de las pruebas simples de campo (siempre que las muestras sean en verdad representativas de las condiciones del subsuelo). El análisis de suelos en laboratorios se ha desarrollado hasta convertirse en una maraña de pruebas interrelacionadas, con una variedad de criterios y métodos.



La American Society for Testing and Materials (**ASTM**) publica periódicamente un resumen de esos procedimientos (**SPT 479**, Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes). Muchas de las técnicas de prueba son exclusivamente aplicables a ciertos grupos de suelos, por lo que los datos resultan incorrectos cuando se intenta su utilización de alguna otra manera. Cuando estructuras afectables por los asentamientos, grandes terraplenes, presas o taludes pronunciados se van a cimentar sobre suelos blandos o de propiedades inciertas, conviene realizar pruebas de laboratorio sobre muestras representativas.

Sin embargo, dichas pruebas son costosas y lentas, por lo que, salvo en proyectos muy importantes, generalmente sólo se realizan unas cuantas de ellas. Por todo lo anterior, las muestras para análisis se deben escoger cuidadosamente.

- * Las **pruebas de índice**, como las de los límites de Atterberg, de densidad y de distribución granulométrica, sirven para clasificar y caracterizar los suelos, conocer sus características ingenieriles generales, evaluar su aptitud como material de relleno y estimar su potencialidad de corrección mediante las técnicas de mejora del terreno. Es común realizar varias de estas pruebas en cada estrato de interés.
- * Las **pruebas de compresibilidad**, como las de consolidación y de compresión triaxial, generan valores que permiten evaluar los asentamientos que ocurren bajo carga. Las pruebas de consolidación se hacen sobre suelos plásticos, mientras que las de compresión triaxial se destinan a suelos granulares. Asimismo, las pruebas de consolidación y la máxima presión a que ha sido sometido el suelo con anterioridad. Las pruebas de compresión triaxial también sirven para evaluar la rigidez de las arenas (una propiedad que aumenta al elevarse la presión de confinamiento) y el incremento de resistencia de las arcillas por consolidación.
- * Las **pruebas de resistencia en laboratorio** miden la resistencia del suelo a fin de calcular su capacidad de carga, la resistencia a los empujes laterales de la propia tierra y la estabilidad de los taludes. La resistencia de las arenas se mide por medio de pruebas triaxiales y directas de esfuerzo cortante. Las pruebas con cizalla de espas, compresión y confinamiento y compresión triaxial, que se realizan en laboratorio, son aplicables a los suelos de tipo cohesivo.

Al efectuar las pruebas de resistencia, es necesario que las condiciones de drenaje durante ellas reproduzcan lo más fielmente posible las condiciones que prevalecerán en el estrato del suelo o terreno cuando se imponga la carga esperada. Todas las pruebas, salvo la triaxial, se realizan en condiciones no drenadas y se aproximan a las condiciones de carga rápida del terreno, como sucede con la mayoría de las cimentaciones y excavaciones para construcción.

Las pruebas triaxiales permiten realizar los estudios bajo condiciones no drenadas, consolidadas no drenadas y consolidadas drenadas. Las pruebas que se realizan en condiciones drenadas sirven para conocer factores como la estabilidad bajo un terraplén después de haber disipado las presiones excesivas en los poros.



Si existe la posibilidad de que las arenas saturadas sueltas queden sometidas a cargas sísmicas, su resistencia a cargas cíclicas y su potencial de licuefacción se miden mediante pruebas triaxiales cíclicas.

MEJORA DEL SUELO O TERRENO

El suelo como material ingenieril, se diferencia de la piedra, la madera y otros materiales naturales por el hecho de que puede ser modificado para darle las características deseadas. La mejora del suelo es una práctica antiquísima que permite construir en terrenos con condiciones marginales, por lo que se emplea con frecuencia en la ingeniería geotécnica contemporánea.

La corrección se realiza a través de métodos aplicados **in situ** o mediante la construcción de rellenos artificiales. En cualquier caso, los objetivos son una mayor capacidad de carga y la prevención de asentamientos. Se han desarrollado muchas técnicas, como densificación, sobrecarga, nivelación y construcción de rellenos, que gozan de amplia aceptación.

Estos métodos han sido la causa, en buena medida, del creciente uso de terrenos marginales a bajo costo.

Rellenos artificiales

En el presente capítulo, el término *relleno* se refiere a los materiales térreos que se usan principalmente para nivelar o elevar la superficie del terreno, y no a las estructuras de contención, como diques de tierra. Sin embargo, casi todos los principios generales que se presentan son aplicables a ambos tipos de obras.

La mayor parte de los terrenos necesitan algún tipo de relleno artificial, al menos para asentar las losas (firmes) para pisos y pavimentos. No obstante, esos rellenos presentan muchos problemas, como compactación inadecuada, cambios de volumen y asentamientos imprevistos causados por su propio peso. A fin de obviar esos problemas, los rellenos se consideran elementos estructurales del proyecto, de modo que también se diseñan con esmero. Los materiales y su granulometría, colocación, grado de compactación y, ocasionalmente, espesor, deben ser cuidadosamente elegidos para soportar las cargas previstas.

Existen dos tipos básicos de relleno: el que se hace en seco mediante maquinaria y técnicas ordinarias de movimiento de tierras, y el que se realiza en húmedo con dragas hidráulicas. Este último tipo es el que se suele utilizar para la construcción de bordes de contención de aguas o para grandes rellenos.

Hay una amplia variedad de materiales y tamaños de partículas que resultan adecuados para rellenos en la mayor parte de los casos, aunque se debe evitar el uso de materia orgánica y basura. La economía sugiere que el banco de materiales de rellenos esté lo más cerca posible del lugar de la obra y, sin embargo, esto mismo cancela la posibilidad de usar ciertos tipos de material.

Por ejemplo, es probable que los factores económicos impidan el secado de suelos de grano fino saturados con agua. En casi todos los rellenos, el tamaño máximo de los fragmentos para la capa de **45 cm** situada inmediatamente por debajo de los cimientos, losas o a la superficie del terreno, debe ser de **7,5 cm** de diámetro, es decir, una sexta parte del espesor.

La prueba más común para evaluar la utilidad aproximada de los suelos como material de relleno y fijar una especificación de compactación mínima es la prueba de relación humedad-densidad (**ASTM D698 y D1557**), a la también se da el nombre de prueba **Proctor**. En la figura se presenta un ejemplo de prueba **Proctor**, con los resultados correspondientes a arenas, limos y arcillas, así como la línea de saturación del 100%, o de cero burbujas de aire.

Es necesario realizar varias pruebas sobre el material de relleno y establecer su relación estándar de humedad -densidad. El punto más elevado de la curva representa la máxima densidad obtenible en laboratorio, según el método de prueba, y el contenido óptimo de humedad.

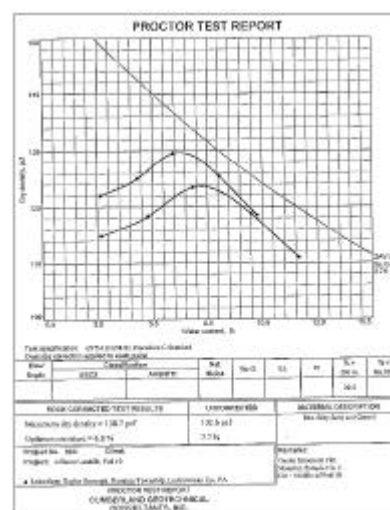
Las dos pruebas de la ASTM representan diferentes niveles de trabajo de compactación. No obstante, en el campo se puede realizar una compactación más intensa que en el laboratorio. De este modo, es factible que exista una diferente relación de humedad-densidad en el terreno; por tanto, los resultados de la prueba Proctor no deben ser considerados como una propiedad inherente del material. Las curvas indican el contenido de humedad y el control que se necesita en el campo a fin de obtener la densidad especificada.

Compactación de terrenos

El grado necesario de compactación de los rellenos se expresa normalmente como un porcentaje mínimo de la máxima densidad en seco, obtenida mediante una prueba de laboratorio, que se debe lograr dentro de ciertos límites estipulados de humedad. Por lo general se especifican densidades que representan del **90 al 100% de densidad máxima**, cuando el contenido de humedad es del 2 al 4% del contenido óptimo de humedad. (La prueba ASTM D1557 sirve como punto de referencia cuando se necesita una gran capacidad de carga y baja compresibilidad; la ASTM D698 es adecuada si los requisitos no son tan estrictos, como sucede en zonas de estacionamiento ,aparcamiento). En casi todos los rellenos, basta con un 90 a 95% de la densidad máxima; la compactación del 100% es necesaria en el caso de carreteras, zapatas de cimentación y otras estructuras de las edificaciones industriales intensamente cargadas.

Nótese que las densidades del campo pueden representar más del 100% del valor máximo calculado en laboratorio. Además, si se hace un trabajo de compactación más intenso, esas densidades se pueden lograr con humedades por debajo de la curva establecida en el laboratorio.

No obstante, no se debe sobrecompactar los materiales de grano fino que estén en el lado seco de la curva óptima, ya que luego pueden expandirse y aflojarse al saturarlos con agua.



Los rellenos ordinarios, en las construcciones industriales, se construyen en capas de **10 a 60 cm** de espesor. Cada capa se compacta antes de colocar la siguiente. El grado de compactación real se determina por medio de pruebas de densidad, efectuadas en el campo, sobre muestras de cada capa. Para ese fin, es necesario medir la densidad húmeda y el contenido de humedad, aparte de calcular la densidad en seco. Las densidades se miden en el campo con los métodos de cono de arena (ASTM D1556) o de globo volumétrico (ASTM D2167), si la muestra no está alterada, o en caso contrario con el medidor nuclear de humedad-densidad (Densímetro Nuclear). A menudo basta con una prueba por cada **350 a 900 m³** de relleno.

En proyectos a gran escala, en los que se utiliza maquinaria pesada de compactación, es posible tender capas de **45 a 60 cm** y más de espesor. Sin embargo, en casi todos los proyectos los espesores de las capas deben ser limitados al máximo que garanticen la densidad exigida los equipos de compactación disponibles en Obra.

Por lo general no es necesario compactar los rellenos hidráulicos que se construyen con suelos dragados en el momento de colocarlos; algunos, incluso, jamás se compactan.

En estos casos, un fenómeno común es la segregación de las fracciones de limos y arcillas dentro del material dragado, pero esto no tiene efectos nocivos; sin embargo, se debe evitar la acumulación de estos materiales finos en los huecos adyacentes a los bordes o debajo de estructuras. El uso adecuado de diques internos, vertederos y técnicas de decantación impide tal acumulación.

Siempre se debe tener presente que los rellenos son cargas muertas muy pesadas, por lo que pueden someter a esfuerzos muy intensos los estratos subyacentes del suelo, incluso los profundos. Una capa de 30 cm de relleno compactado equivale, en carga, a 1.5 niveles de un edificio ordinario de oficinas. Se pueden presentar problemas indeseables, tales como, si una edificación está plantada a horcajadas encima de la línea de contención de un relleno, es muy probable que ocurra un asentamiento diferencial perfectamente delineado.

Los rellenos hidráulicos profundos llegan a ocasionar hundimientos superficiales del orden de varios decímetros.

Las estructuras apoyadas en pilotes, con firmes (losas a nivel del terreno) asentados en rellenos profundos, pueden, conforme el relleno se asienta, sufrir daños ocasionados por la diferencia de movimiento de los firmes, entradas de servicio y entradas principales respecto a la estructura piloteada.

Los tirantes de anclaje que se utilizan para los bordos de contención de aguas y que pasan a través del relleno hidráulico llegan a tener sobrecargas debidas al asentamiento subsecuente del relleno; a fin de evitar esas sobrecargas, los tirantes deben quedar alojados dentro de tubos antes de cubrirlos con el relleno.

Densificación

Para la *densificación* se utilizan varias técnicas diferentes, que en general consisten en alguna forma de vibración. La densificación es la compactación *in situ* de los suelos, principalmente de tipo granular, con el objeto de aumentar su densidad. La posibilidad de aplicar estos métodos depende, como se muestra en el figura..., del tamaño de las partículas del suelo. En consecuencia, la distribución granulométrica es un factor que debe ser evaluado cuidadosamente antes de escoger el método de densificación.

Las arenas limpias pueden ser densificadas fácilmente hasta una profundidad de **1.8 m** mediante el simple paso de una pesada aplanadora vibratoria con rodillo de acero. La frecuencia de vibración es ajustable en cierto grado, aunque en general se obtienen resultados óptimos dentro de los límites de **25 a 30 Hz**. (Por debajo del nivel de 1.8 m, la densificación es mínima e incluso se da el caso de que se aflojen los 30 cm superficiales si se insiste en la compactación.)



Los **métodos de vibroflotación y Terra-Probe** incrementan las densidades de las arenas mediante la inserción repetida de las sondas vibratorias. Los huecos cilíndricos que se forman con el vibrador se rellenan luego con arena acarreada del terreno. Los puntos de inserción del vibrador suelen ir agrupados, con una separación típica de **1.5 m** en los sitios donde se van a erigir las columnas del edificio. Con este método se obtienen densidades relativas de un **85 %** o más en toda la profundidad de inserción, la cual puede ser de más de **12 m**. Estas técnicas, sin embargo, no sirven cuando el contenido de partículas finas del suelo es de más de un **15 %** o cuando hay materia orgánica en forma coloidal en cantidades de más del **5 %** en peso.

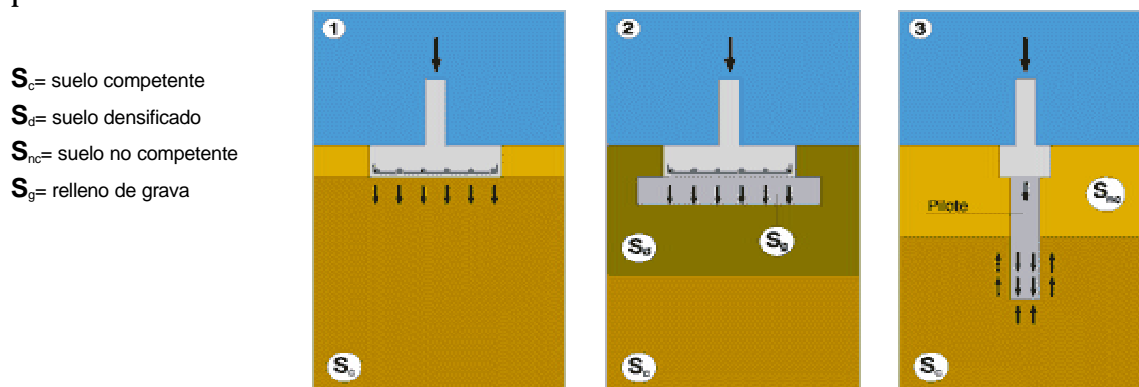
Los **pilotes de compactación** son de una alternativa que se emplea para densificar las arenas y permitir el uso subsecuente de cimientos poco profundos. Los pilotes pueden ser de cualquier material, aunque generalmente son de madera o se trata de un pilote de arena por sustitución, el cual se construye hincando en el terreno un casquillo que luego se rellena con arena. El volumen que desplazan los pilotes y la vibración que provoca la operación de hinca, densifican el suelo circundante.

Por lo general, el elemento estructural de los cimientos no se apoya directamente sobre el pilote de compactación, sino en la masa densificada. Por lo común, los pilotes de compactación se usan bajo las mismas condiciones estructurales y subterráneas de las técnicas de vibroflotación y Terra-Probe.

Otra técnica para la densificación en gran escala es la **compactación dinámica**, un método diseñado por Techniques Louis Menard, que consiste en dejar caer grandes pesas desde una buena altura sobre el terreno. Las pesas van de **10 a 40 ton** de peso y las alturas desde las cuales se dejan caer llegan a ser de hasta **30 m**; la distancia entre los sitios de impacto es de hasta **18 m**, de centro a centro. En cada punto se realizan varios impactos y es necesario dar varias de estas pasadas sobre el terreno. Con esta técnica se pueden densificar suelo o terrenos con casi todos los tamaños de partículas y materiales, como se aprecia en la figura...

Es posible compactar arenas sueltas, para que alcancen estados que van de densos a muy densos, a profundidades de **7,5 a 10,5 m**, mediante el uso de pesas de **15 ton** que dejan caer desde una altura de **24 m**. Si las pesas son de **40 ton**, las profundidades de densificación se amplían hasta **12 a 15 m**, con un mayor incremento en la densidad. En el caso de las arenas y limos no plásticos, se pueden lograr asentamientos forzados del terreno de hasta **60 cm**.

En esta técnica, la densificación se realiza como si el terreno hubiera sido sometido a una serie de miniterremotos; la compactación es el resultado de una licuefacción parcial (donde el suelo o terreno está saturado de agua) y del paso del tren de ondas. En las masas saturadas se producen mayores presiones en los poros, por lo que es necesario aguardar la disipación de esas presiones antes de hacer las siguiente pasada de golpes; de lo contrario, el efecto del golpe se nulifica y no hay mayor compactación. En la figura se dan los resultados de un trabajo de compactación dinámica, en gran escala, realizado en Bangladesh. Dichos resultados se expresan como una gráfica de los valores promedio de la prueba estándar de penetración (**SPT**), antes y después de la compactación, según la profundidad.

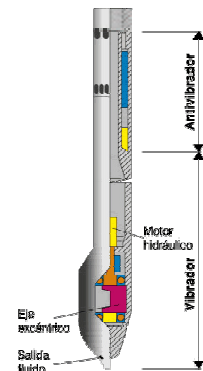


Los diferentes métodos para mejorar los terrenos, deben ser, ante todo, económicos. Las ventajas de estas técnicas en comparación con otros métodos de cimentación, como las cimentaciones profundas (pilotes «in situ», módulos portantes, etc.), son las siguientes:

- **No precisan excavaciones**, no planteando problemas ambientales con el transporte y la eliminación de residuos.
- **Condiciones simples de cimentación**, son similares a los suelos naturales con suficiente capacidad de carga.

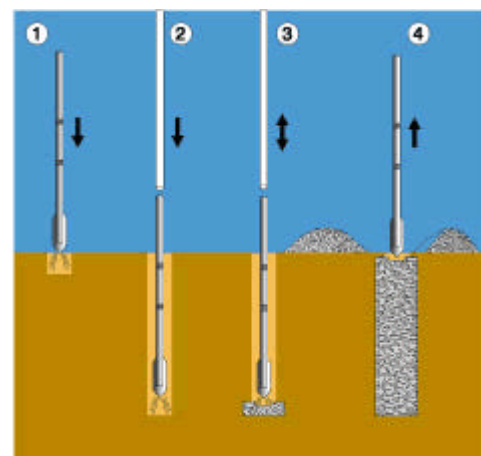
La técnica de ejecución es mediante la introducción del vibrador en el terreno, por su propio peso y con ayuda de la inyección de agua a presión por su punta.

Creación de un estado de licuefacción local mediante vibración que facilita la penetración del vibrador y su conjunto en el suelo hasta alcanzar la profundidad requerida en cada caso, arrastrando el agua en su circulación inversa a los finos procedentes de la perforación.



Alcanzada la profundidad deseada se disminuye la inyección de agua en punta comenzando entonces la aportación de grava. El vibrador sube y baja vibrando e inyectando agua, arrastrando a su vez grava, la cual se compacta en el interior del terreno formando la columna; durante esta operación se forma un cono superficial debiéndose de aportar la grava de forma rápida y continuada con una pala auxiliar.

La extracción lenta y escalonada del vibrador por tongadas crea una zona densificada cuyo diámetro depende de las características del terreno y la potencia empleada.



Sobrecargas

En ocasiones, los materiales adecuados de cimentación descansan en arcillas blandas y comprimibles, en las que pueden ocurrir asentamientos indeseables. En tales casos, el terreno se puede volver utilizable si se sobrecarga la superficie. La finalidad de la sobrecarga es cargar y consolidar por anticipado las arcillas, lo que cancela la posibilidad de asentamientos ulteriores por debajo de las estructuras. Otra finalidad concurrente es el incremento de la resistencia del suelo arcilloso.

En la práctica, el proceso es muy simple cuando la arcilla está cubierta por los suelos superficialmente sólidos, pues la capacidad de carga no es un problema. El área que se desea mejorar se carga con tierra floja, amontonada, hasta que el peso de ésta es equivalente a la carga que se impondrá posteriormente al construir la estructura definitiva. (Si existen arcillas muy plásticas o capas muy gruesas con escaso drenaje interno, tal vez se necesite hacer drenajes de arena a fin de lograr la consolidación dentro de un plazo razonable). Conviene vigilar los asentamientos de la superficie original del terreno y de la capa arcillosa durante la colocación de la sobrecarga y después de ésta. El relleno debe permanecer en el sitio hasta que deje de haber asentamientos. Luego se retira la sobrecarga y se erigen las estructuras. Si la sobrecarga se realiza en forma adecuada, las estructuras ya no deben estar sometidas a asentamientos ocasionados por consolidaciones primarias; sin embargo, conviene evaluar la posibilidad de que ocurran asentamientos a causa de la compresión secundaria, sobre todo si el suelo o terrenos tienen un alto contenido orgánico.

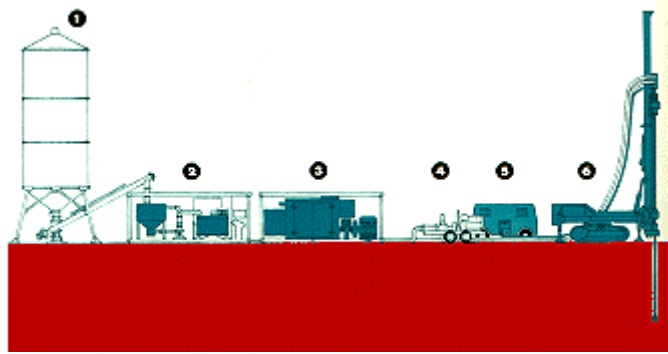
Esta técnica es eficaz en grandes extensiones de terreno. Las limitaciones son la necesidad de un relleno temporal de bajo precio y los prolongados períodos que a veces se necesitan para el asentamiento.

Lechadeado

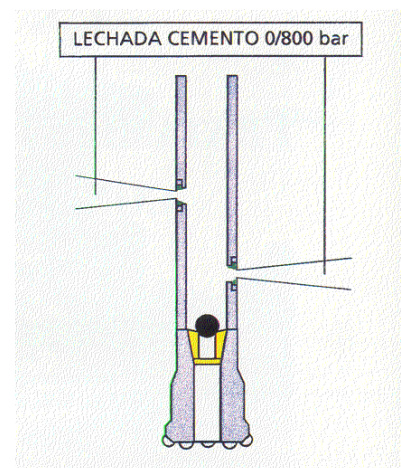
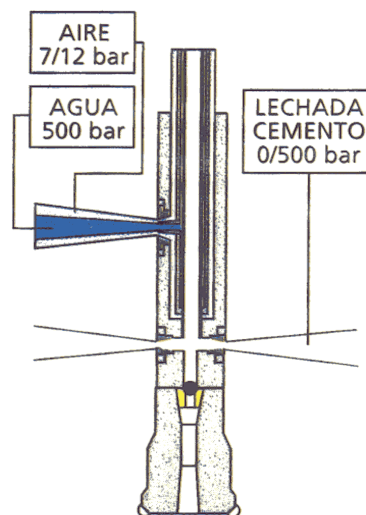
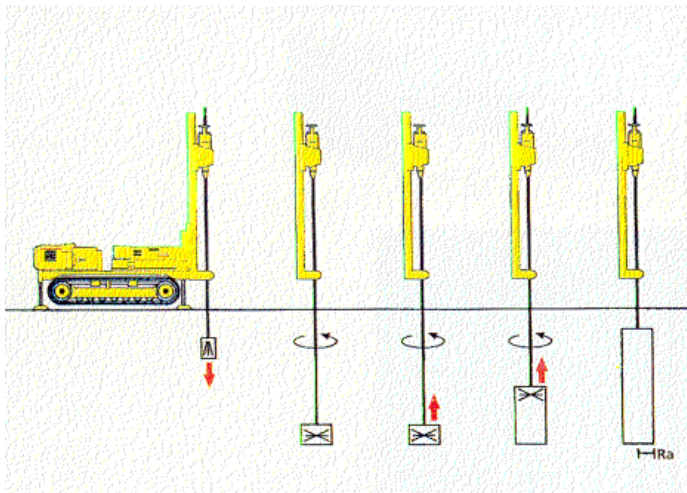
La inyección de materiales cementantes o algún otro agente químico de ese tipo en los suelos y masas rocosas los mejora al rellenar huecos o provocar su compactación. El lechadeado suele usarse para rellenar huecos presentes en las masas rocosas, típicamente las rocas de carbonatos, a fin de restringir las filtraciones o evitar el colapso estructural. Para cada fin específico se han creado materiales y métodos especiales. Por ejemplo, la inyección de geles de fraguado rápido es muy eficaz para la estabilización de arenas flojas; la inyección de lechada de cemento a alta presión se traduce en una compactación localizada de las arenas flojas.

El *Jet-GROUTING* es una técnica de mejora de terreno y de cimentaciones consistente en la inyección de lechada moderna de ampliamente difundida en las soluciones de cimentaciones de las grandes obras.

El *Jet-Grouting*, es una técnica diferente a las demás de consolidación porque destruye la estructura existente del suelo y transforma a la vez en una homogénea masa con la mezcla de una sustancia aglutinante y los granos del suelo.



La maquinaria empleada es altamente especializada (ver figura) e integrada por un complejo de equipos, a saber: ① Silos de material aglutinante; ② Mezcladora (batching plant); ③ Bomba de alta presión; ④ Bomba mezcladora; ⑤ Compresor; ⑥ Perforadora.



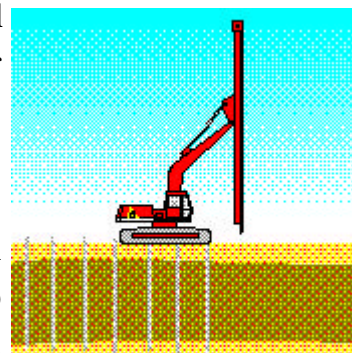
Drenaje

La profundización permanente de la capa freática casi superficial, en el caso de los suelos o terrenos de arena fina o limo, mejora notablemente las capas superficiales, sobre todo cuando se trata de cimentar caminos, zonas de estacionamiento (aparcamiento) y construcciones residenciales de poca elevación. El drenaje es eficaz porque disminuye la resistencia de los suelos al haber un aumento de la cantidad y presión del agua de los poros.



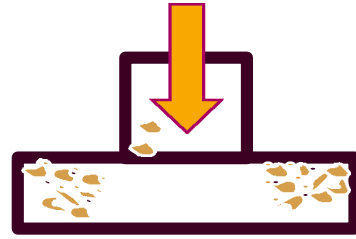
En los suelos granulares, el manto de agua freática se puede profundizar mediante el uso de bombas y pozos verticales, llevando luego el agua hacia cuencas o resumideros ubicados fuera del terreno en cuestión. En el caso de los limos, cuyo drenaje resulta difícil mediante esos medios, se puede recurrir a la electro-osmosis o drenaje eléctrico. En este método se aplica el principio de que el agua fluye hacia el cátodo cuando se hace pasar una corriente directa a través de suelos saturados de ella; luego, el agua se expulsa de este sitio por bombeo.

Se debe tomar medidas para mantener abatido el nivel del agua freática. Por ejemplo, se deben interceptar y desviar del terreno los aportes de agua superficiales y subterráneos. Con ese fin, la superficie del terreno debe ser modificada de forma que se controle el flujo de aguas superficiales; y para ello son muy útiles los parte aguas. Éstos, que se ubican aproximadamente a lo largo de las líneas de contorno topográfico, son particularmente útiles para la estabilización de los taludes de tierra.



DISEÑO DE CIMENTACIONES

La elección de los criterios normativos del diseño de cimentaciones -tipo de cimientos, su profundidad y carga permisible o carga de apoyo- suele ser un proceso repetitivo. Para que brinden un apoyo adecuado, todas las cimentaciones deben cumplir dos requisitos simultáneos:



- a) Capacidad de carga por apoyo adecuada cimentación.
- b) Asentamientos estructurales tolerables.

Aunque relacionados, estos dos requisitos no se satisfacen automáticamente al mismo tiempo.

Una cimentación con insuficiente capacidad de apoyo también se asienta excesivamente; pero lo mismo puede sucederle a una cimentación con capacidad adecuada. Por tanto, los dos factores, **capacidad de carga, o apoyo, y asentamiento**, deben ser revisados para basar el diseño de los cimientos en la condición que resulte crítica.

Pasos del Diseño de Cimentaciones

En la práctica, el procedimiento general que se sigue para el diseño de cimientos consiste:

1. *Determinar la capacidad de carga inherente al tipo o tipos de cimentación posibles, dadas las condiciones del subsuelo y los requisitos estructurales del proyecto.*
2. *Reducir las capacidades últimas de carga calculadas multiplicándolas por un factor de seguridad de 2 a 3. El factor de seguridad más alto se utiliza donde se tiene menor certeza acerca de las condiciones del subsuelo.*
3. *Calcular los asentamientos que pueden ocurrirle a una cimentación con capacidad de carga permisible reducida y con las cargas estructurales previstas.*

4. *Si los asentamientos son estructuralmente aceptables, calcular los costos de los tipos de cimentación satisfactorios, sobre una base que permita comparaciones, como el precio por tonelada de carga en columnas o el costo por metro cuadrado en área construida. Dichos costos deben incluir todos los elementos estructurales del sistema de cimentación, como el casquete (remate) de los pilotes y cualquier trabajo de mejora del suelo que se considere necesario; no se deben olvidar siquiera los costos excepcionales, como la eliminación de aguas. También es necesario ponderar el tiempo que se requiere para la construcción. Si todos los demás factores son iguales, optar siempre por el sistema de menor costo.*
5. *Si los asentamientos son inaceptables en todos los tipos de cimentación considerados, explorar otras alternativas, como mejora del suelo, reubicación del edificio, disminución de las presiones o cargas de apoyo, diferentes profundidades de apoyo y revisión de la superestructura. Repetir los casos 3 y 4 hasta que se encuentre una cimentación segura y lo más económica posible.*

En resumen se debe garantizar la **resistencia y economía** del sistema cimiento.

El Prof. Eduardo Torroja decía: *en definitiva el problema ha de plantearse con estas cuatro premisas o conjunto de ellas:*

- *Finalidad Utilitaria.*
- *Función Estructural o Estática.*
- *Exigencia Estética.*
- *Limitación Económica.*

Capacidad de carga o apoyo de los cimientos.

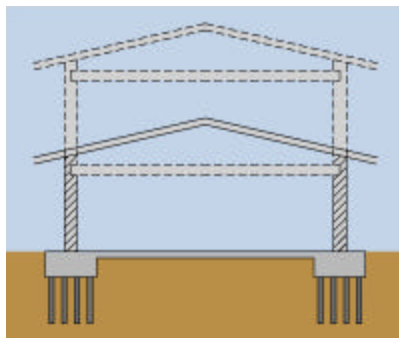
La capacidad de carga o apoyo es una característica de cada sistema de suelo-cimentación, y no sólo una cualidad intrínseca del suelo. Los distintos tipos de suelo difieren en capacidad de carga, pero también ocurre que en un suelo específico dicha capacidad varía con el tipo, forma, tamaño y profundidad del elemento de cimentación que aplica la presión.

"Razón y Ser de los tipos estructurales". Eduardo Torroja Miret - Colección Textos Universitarios nº 13. CSIC.

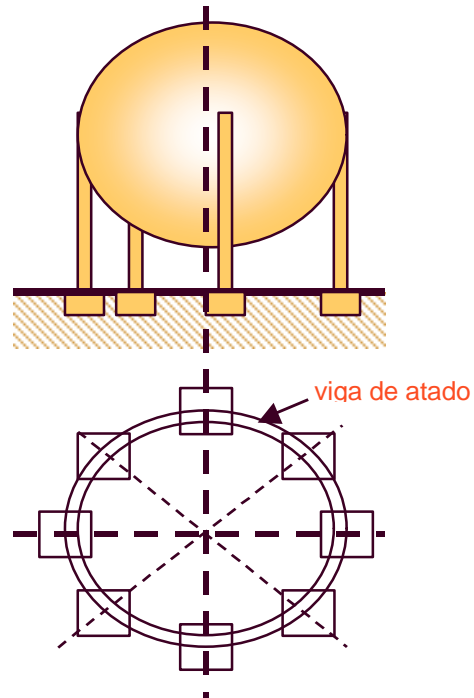
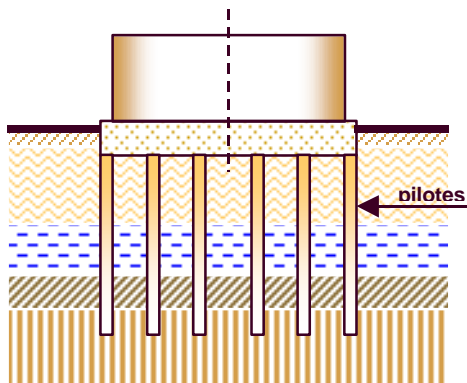
Existen dos tipos básicos de cimentación: **superficial y profunda**. Asimismo, hay algunas variaciones de cada tipo.

Las **cimentaciones superficiales** constan de zapatas (llamadas zarpas en algunos países) aisladas, corridas y ligadas, y cimentaciones flotantes compensadas.

Las **cimentaciones profundas** constan de cajones perforados (pozos descendentes) y muchas variedades de pilotes de concreto hincables o colados en su sitio.



En las Construcciones Industriales-Empresariales existen una enorme variedad de tipos de cimentaciones superficiales y profundas de acuerdo a las estructuras que deben soportar, vgr. Intercambiadores de calor, Torres, Chimeneas, Tanques, Esferas, Naves, etc.



El problema que se plantea es la transmisión de unas cargas del proceso y exteriores al terreno de la forma más económica, que dependerá como hemos visto de;

- Naturaleza del terreno
- Profundidad y Ancho de la cimentación
- Características de la estructura.

Al final del Capítulo hemos reunidos varios ejemplos de cimentaciones industriales, a modo de referencia e ilustración.

BIBLIOGRAFÍA

1. "The Standard Penetration Test", Proceedings of the Fourth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, 1971, San Juan, Puerto Rico. V.F.B. de Mello.
2. "Geotecnia y Cimientos II y III", J.A. Jiménez Salas y otros, Editorial Rueda, Madrid, 1976 y 1980.
3. "Rock Engineering", J.A. Franklin, M.B. Dusseault, Mc Graw Hill, 1989.
4. "Rock Slope Engineering", E. Hoek, L. Bray, Institution of mining and metallurgy, London, 3rd ed. , 1981.
5. "Introduction to rock mechanics", R.E. Goodman, John Wiley, 2nd ed., 1989.
6. "Underground excavations in rock", E. Hoek, E.T. Brown, Institution of mining and metallurgy, London, 1980, Versión en español por Mc Graw Hill, México, 1980.
7. "Túneles: Planeamiento, diseño y construcción". (2 vols)", T.M. Megaw, J.V. Barlett, Ed. Limusa, México, traducido de la versión inglesa de Ellis Horwood (Wiley), New York, 1981.
8. "Dinámica de suelos y estructuras", R. Colindres, Limusa, 2 ed., México, 1993.
9. "Finite elements in Geotechnical Engineering", D.J. Naylor, G.N. Pande, B. Simpson, R. Tabb, Pineridge Press, Swansea, 1981.
10. "Measurement of In situ Shear Strength", Conference on In situ Measurement of Soil Properties, Vol.II, 1975 American Society of Civil Engineers. J. Schmerttmann.
11. "NLT Normas de Ensayos del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX" - Suelos. MOPT.
12. "Soil Mechanics in Engineering Practice", John and Wiley, Inc. K. Terzaghi y R.B. Peck.
13. "Bearing Capacity of Piles in Cohesion less Soils".

14. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division
15. “Maquinaria de Movimiento de Tierras: Criterios de Selección”. F. Ballester/J. Capote
16. “Construction Equipment Guide”. David. A. Day
17. “Maquinaria de Construcción”. M. Díaz del Río.
18. “Enciclopedia de la Construcción”. F. Merrit.
19. “El Terreno”. R. de Heredia /A. Prado.

