

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**TEMA 2
INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

ÍNDICE

1. Introducción
2. Estudios y reconocimientos geotécnicos
3. Cimentaciones
4. Estructuras de contención
5. Geotecnia Vial

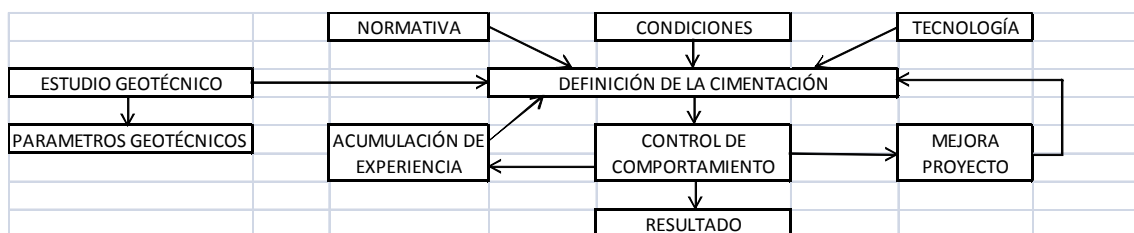
BIBLIOGRAFÍA

1. Introducción

En la Ingeniería Geotécnica se trata de estudiar el comportamiento del terreno como soporte de los diferentes tipos de obras que se proyectan y construyen sobre el mismo.

Estas obras transmiten al terreno unas cargas, que originarán unas deformaciones (asientos). Se pretende cuantificar estas deformaciones y comprobar si son compatibles con el tipo de estructura que se quiere construir. Al elemento estructural que transmite las cargas hacia el terreno es le denomina Cimentación.

El proceso para elegir el tipo de cimentación se apoya en el siguiente esquema:



Mediante este proceso se pretende adecuar el tipo de cimentación al tipo y naturaleza del terreno, evitando los daños que provoca una cimentación deficiente.

A lo largo de este tema se expondrán las técnicas, ensayos y conclusiones que se relacionan con la redacción de estudios geotécnicos.

Posteriormente se expondrán los distintos tipos de cimentación, las distintas estructuras de contención, y, por último unas nociones de Geotecnia Vial.

2. Estudios y reconocimientos geotécnicos

El proceso de diseño de una obra de Ingeniería Geotécnica exige siempre y como primer paso la redacción de un Estudio geotécnico.

Se exponen a continuación y de forma sucinta los antecedentes a considerar, las técnicas de reconocimiento, los sistemas de toma de muestras y ensayos sobre las mismas y los parámetros que se obtienen como conclusión de un Estudio.

- Antecedentes
 - Publicaciones Oficiales (Mapas geotécnicos, Estudios Previos,...)
 - Datos básicos de la obra (Ubicación, Tipo, Cota de excavación, Altura de terraplén,...)
 - Información complementaria (Experiencia local, Entorno, Hidrología,...)
- Técnicas de reconocimiento

Para la prospección del terreno se pueden utilizar:

 - Catas o pozos (profundidad menor a 4.)
 - Sondeos mecánicos

Máquina de ejecución de sondeos



Tubo de ejecución de sondeos con muestras.

Caja de testigos de sondeo

- Pruebas de penetración



Máquina ejecución penetrómetro.

Puntas de penetrómetro

- Pruebas in situ (CBR, Carga con placa,...)

Prueba de cálculo CBR "in situ"



- Métodos geofísicos para grandes áreas.
- Toma de Muestras

Son porciones representativas del terreno porque conservan sus propiedades y que permiten identificar el suelo y ensayar en laboratorio. Pueden ser alteradas (sacos de material en una cata) o inalteradas (en sondeos).
- Ensayos de laboratorio
 - De clasificación, como Granulometría, Plasticidad, Contenido de materia orgánica, Densidad, Humedad, Agresividad, Porosidad, etc.
 - De Resistencia, Resistencia a compresión, Resistencia a la penetración, Resistencia al desgaste, Resistencia al corte, etc.
 - De Deformación, Triaxial, Edométrico, Hinchamiento

- Parámetros geotécnicos

Un terreno está caracterizado por algunos parámetros fundamentales, de entre ellos destacan:

- Ángulo de rozamiento interno ϕ
- Cohesión, C.
- Módulo de deformación, E.
- Densidad máxima y humedad óptima (ensayos proctor normal y modificado)
- Presencia de sulfatos.

Todo informe geotécnico concluye en unas recomendaciones de cimentación y uso de los suelos analizados en relación a las obras que se pretenden construir sobre los mismos.

3. Cimentaciones

Son los elementos a través de los cuales una estructura, o una obra, transmite las cargas al terreno. Una cimentación debe transmitir cargas admisibles por el terreno y con una deformación de éste compatible con la obra que sustenta.

Tradicionalmente, las cimentaciones se han clasificado por la profundidad a la que entregan las cargas al terreno, distinguiéndose tres categorías:

- Superficiales (profundidad <3m.)
- Semiprofundas (entre 3 y 6 metros)
- Profundas (más de 6 metros)

3.1. Cimentaciones superficiales

Son las que se construyen sobre terrenos consistentes a escasa profundidad. Obviamente suponen la más barata de las opciones de cimentación y, por ello, la opción escogida siempre que es posible.

La cimentación superficial se puede concretar en zapatas para cargas puntuales o en forma de losas para cargas distribuidas.

3.1.1. Condiciones de diseño.

- Transmitir al terreno las cargas con asientos tolerables.
- Resistencia suficiente como elemento estructural
- Construcción que considere la posible agresividad del terreno
- Considerar las posibles modificaciones en el comportamiento del terreno como consecuencia de acciones naturales (hinchamiento) o artificiales (cambios en los niveles freáticos)

3.1.2. Cálculo

El proceso de cálculo de una zapata tiene varios aspectos a considerar.

En primer lugar, del estudio geotécnico, se obtiene una carga de hundimiento q_h .

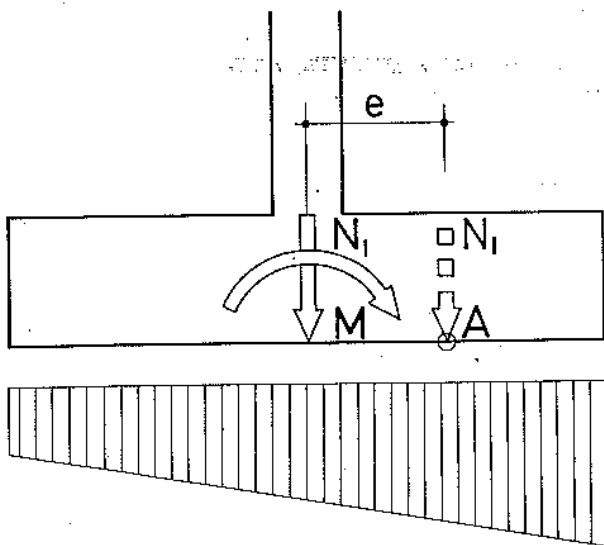
Esta carga de hundimiento se la afecta de un coeficiente de seguridad, F , para determinar una carga admisible por el terreno, q_{adm} , cumpliéndose la ecuación de

$$q_{adm} = q_h / F$$



Una vez obtenida la carga admisible, al multiplicarla por la superficie de la zapata se obtiene la carga total que soportaría la misma.

Este proceso tan simple sirve para efectuar un primer diseño de la zapata, pero, posteriormente, habrá de comprobarse la carga realmente transmitida al terreno así como el proyecto estructural de la misma que incluye espesores y armaduras.



Hay que considerar que la carga que transmite un elemento estructural (pilar, columna, pila) a la zapata consta de un esfuerzo axial, N , y un momento, que se puede expresar como el producto $N.e$, donde el término e es conocido como excentricidad. Este momento origina que la carga transmitida por la zapata al terreno no sea

uniforme, tanto menos uniforme cuanto mayor sea la excentricidad. La mayoría de las obras se intentan diseñar de manera que las excentricidades de las cargas que llegan a cimentación sean lo más pequeñas posibles para evitar que las mismas fuercen el “giro” de la zapata y desperfectos en la obra. Es habitual que se consideren excentricidades situadas dentro del denominado “núcleo central”, que implica que no aparecerán tracciones en ningún punto de la sección. También se tienen en cuenta las cargas añadidas por peso propio de la zapata y la carga de tierra sobre la parte superior de las mismas.



Las zapatas suelen estar armadas en la cara inferior de las mismas, zona en la que es previsible que pudieran aparecer tracciones y no suelen armarse en la cara superior (ver figura)

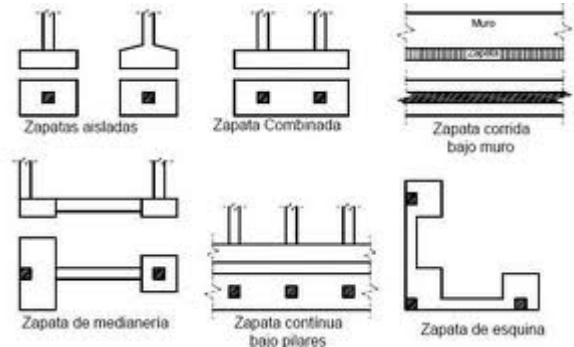
En el caso de proyectarse mal una zapata se produce un fallo grave de diseño y una posible causa de ruina en la obra.

Si el fallo es estructural de la zapata, p.e. si el canto es demasiado reducido, normalmente se fractura el bloque de hormigón de la zapata.

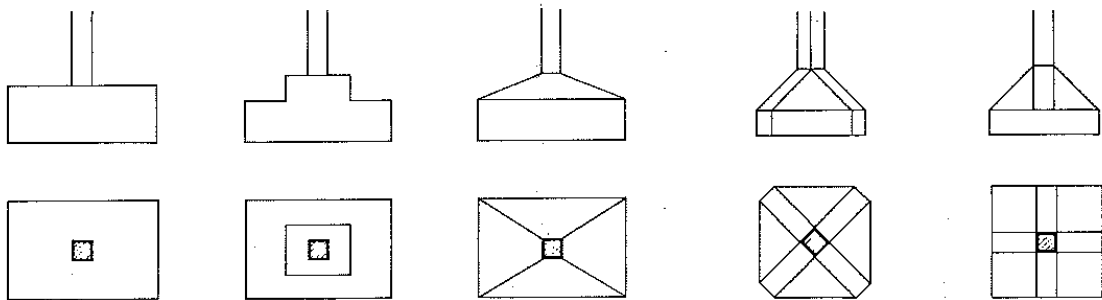
En ocasiones la zapata se mueve por un defecto en el cálculo de la carga admisible que va desde una rotura general, todo el terreno bajo la zapata colapsa y la zapata se desplaza junto al terreno en el que apoya, rotura por punzonamiento, la zapata se hunde verticalmente, o rotura local, el terreno falla puntualmente en la zona más solicitada y la zapata puede cabecear.

3.1.3. Clasificación de zapatas.

- Por su forma de trabajo, pueden ser aisladas, combinadas (de 2 ó más zapatas), continuas bajo pilares o bajo muro o arriostradas



- Por su morfología, la mayoría son prismáticas (las más fáciles de construir), pero pueden ser escalonadas, ataluzadas y aligeradas o nervadas. Todas éstas últimas optimizan el hormigón a lo estructuralmente necesario.



- Por su geometría en planta suelen ser rectangulares o cuadradas, aunque a veces se construyen circulares o poligonales. En general las geometrías más complejas se corresponden a losas que se adoptan a las condiciones de la obra que sostienen.

3.2. Cimentaciones semiprofundas.

En ocasiones, el terreno firme se encuentra a profundidades mayores a los 3 metros pero no tan profundo como para requerir cambiar la tipología de la cimentación.

En estos casos se recurre a pozos y pedestales. Ambas opciones son similares a zapatas pero con elementos estructurales algo distintos para alcanzar esa profundidad mayor.

Los pozos son perforaciones que se rellenan de hormigón estructural en toda su profundidad o de hormigón pobre hasta un cierto nivel sobre el que se construye una zapata estándar.

Los pedestales (ver figura) se asemejan a una zapata escalonada.

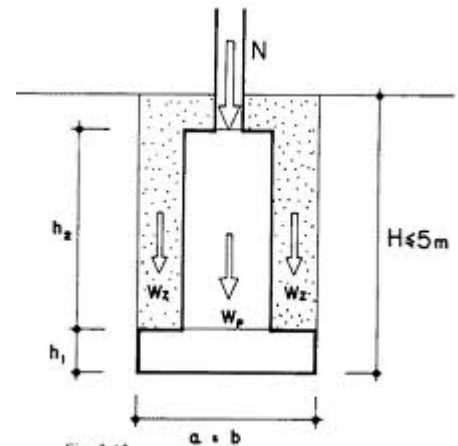


Fig. 3.63.

3.3. Cimentaciones profundas

Son elementos de gran longitud y que, por tanto, transmiten las cargas a gran profundidad. Estos elementos se denominan pilotes.

Estos elementos actúan a modo de columnas completamente embutidas en el terreno. Se utilizan desde las primeras civilizaciones, entonces en madera, y actualmente se suelen fabricar de acero o de hormigón (prefabricados o in situ)

Tradicionalmente se distinguen los pilotes entre:

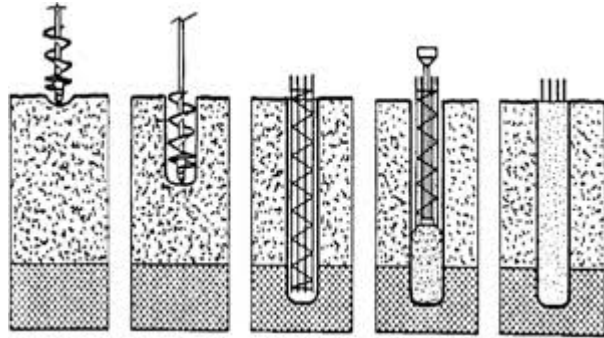
- Hincados, donde el elemento estructural se fabrica fuera (de madera, metálico o de hormigón) y posteriormente se clava mediante golpes en cabeza.



Máquina de hincado de pilotes de hormigón

- Pilotes “in situ”, donde primero se excava el hueco del pilote para luego introducir armaduras y hormigonarlo. En ocasiones la excavación requiere de sistemas auxiliares para evitar que las paredes se desprendan hacia el hueco del pilote (entibación recuperable o no o auxilio de lodos bentoníticos).

Esquema de perforación y ejecución de un pilote in situ



- Normalmente el elemento perforador es del tipo barreno aunque, a veces, es con cuchara.

Sólo se recurre a pilotaje cuando no es posible la cimentación directa o se quiere asegurar unos asentamientos reducidos.

Los pilotes trabajan de dos formas. Por un lado, las paredes del contorno del pilote, al recibir solicitaciones, “rozan” contra el terreno que las rodea. A la carga que transmiten de esta forma se la denomina carga por fuste.

Por otro lado, la punta del pilote puede apoyarse en un estrato resistente, transmitiendo carga, carga que se denomina “de punta”.

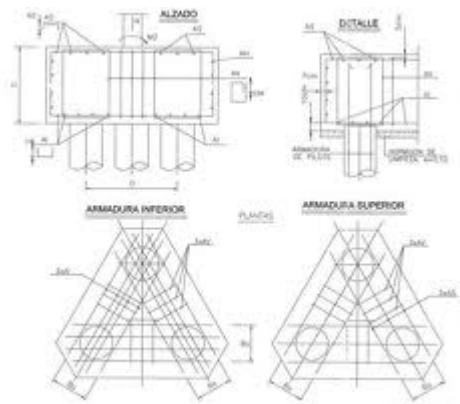
Hay ocasiones en las que los pilotes sólo trabajan de una de estas dos formas. Si el pilote sólo trabaja `por fuste, se denomina pilote flotante. Si sólo trabaja por punta se denomina pilote columna.

Para el cálculo de un pilotaje es necesario determinar la carga de hundimiento, que, a su vez, es el resultado de sumar los términos de resistencia por fuste (área de contorno por resistencia unitaria) más la resistencia por punta (sección del pilote por resistencia en punta). Esta carga de hundimiento es teórica y se la afecta de un coeficiente de seguridad para determinar la carga admisible. El coeficiente suele ser superior a 3.

Con la carga admisible unitaria por pilote, se analizan los grupos de pilotes, se comprueban asentamientos, se dimensionan estructuralmente tanto el pilote como los elementos auxiliares como encepados y vigas riostras.

Por aportar una idea de cargas admisibles en función del tipo de pilote, indicar que un pilote de madera soporta en el entorno de $4,5\text{N/mm}^2$, uno prefabricado de hormigón entre 7 y 10 N/mm^2 y uno de hormigón in situ entre 3 y 4 N/mm^2 .

Los pilotes reciben los esfuerzos de la estructura que soportan, siendo habitual que exista más de un pilote por cada pila o columna de la estructura. En estos casos, los pilotes se solidarizan con un elemento prismático de hormigón fuertemente armado que se denomina encepado. Los encepados más habituales son de 2 , 3 y 4 pilotes.



Encepado de tres pilotes



Viga riostra

También es habitual conectar unos encepados con otros por medio de vigas de hormigón armado que se denominan vigas riostras. El ancho debe ser superior a 30 cm . y el canto a $1/12$ de su longitud. Estas vigas también se utilizan entre zapatas de cimentación.

4. Estructuras de contención

La mayor parte de las obras implican la alteración del terreno sobre el que se asientan, bien sea rebajando el terreno natural o bien sea suplementando. En uno y otro caso se generan diferencias de nivel entre los terrenos existente y proyectado. Estas diferencias de nivel se pueden resolver de forma suave con taludes, siempre que las condiciones del terreno y el espacio disponible lo permitan. En otras ocasiones la transición debe hacerse de forma brusca mediante estructuras que aseguren la transición de nivel independientemente de la calidad del terreno y limitando el espacio dispuesto. A la estructura de contención característica se la conoce como MURO.

4.1. Muros de Contención

Un muro de contención debe soportar las acciones que le transmite el terreno (empujes) y transmitir dichos esfuerzos hacia el terreno en su base.

Los muros pueden ser rígidos o flexibles.

Los muros rígidos no se deforman y su fallo se origina por deslizamiento o por vuelco.

Los muros flexibles se deforman, es el caso de las pantallas.

El esquema básico de un muro de contención se aprecia en la figura adjunta.

En la misma se distinguen dos zonas en la zapata de cimentación, la puntera y el talón.

La puntera es la parte de zapata que queda situada en la cara libre del muro, mientras que el talón queda situado en el trasdós del muro. Existen muros con puntera y talón o con sólo una de las dos. La existencia de talón exige excavar el trasdós y encofrar el muro a dos caras.

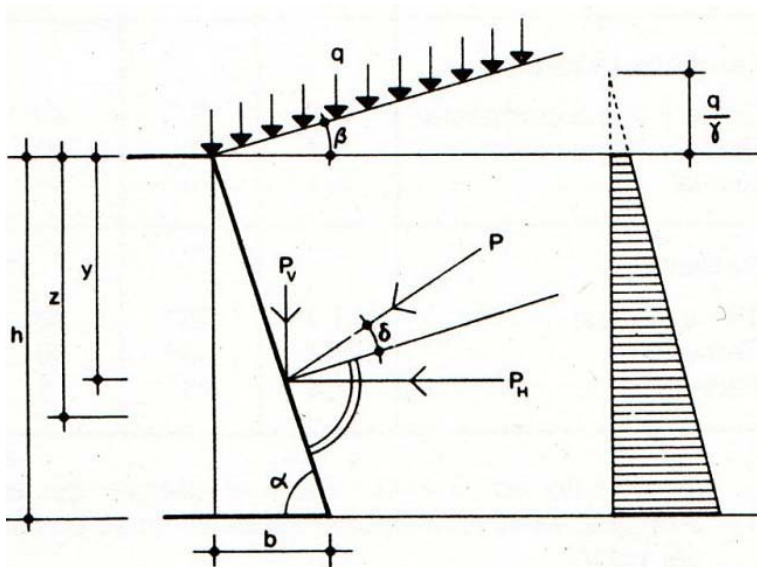


En los muros de sótano para edificios, es habitual encofrar contra el terreno por lo que los muros sólo tendrían puntera.



Construcción de muro de sótano por bataches.

Para conocer el empuje que un terreno transmite a un muro es imprescindible conocer sus características.



La fórmula más utilizada fue formulada por el físico francés Coulomb

$$E = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a$$

En dicha fórmula, el factor determinante es el coeficiente de empuje activo K_a , que depende a su vez del ángulo de rozamiento interno (φ), del talud del muro en

contacto con la tierra (α) y del ángulo del terreno sobre coronación (β).

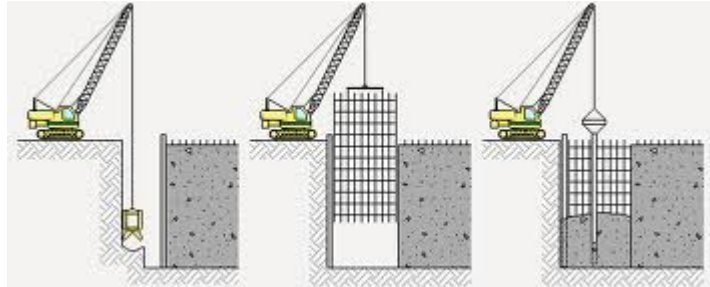
El efecto es que el empuje se desplaza respecto a la normal al plano del muro un ángulo δ , denominado coeficiente de rozamiento interno terreno-fábrica y cuyo valor oscila entre $1/3$ y $2/3$ del φ . (ver figura)

Con este valor de empuje se comprueba la estabilidad al vuelco y al deslizamiento y por último la estabilidad estructural.

4.2. Estructuras flexibles

Son estructuras cuya rigidez estructural es menor y, por ello, se deforman ante la acción de las cargas del terreno. La más característica de estas estructuras son las pantallas de hormigón armado

Las pantallas se suelen ejecutar por bataches (tramos de entre 2,5 y 6 metros de longitud), excavadas con una cuchara bivalva especial con un ancho de entre 0,5 y 1,2 metros.



Esquema de ejecución de un tramo de pantalla

En ocasiones, la falta de consistencia del terreno obliga al uso de lodos benoníticos para garantizar que la excavación se sostenga hasta su conclusión. Estos lodos son desplazados por el hormigón y son reutilizables.



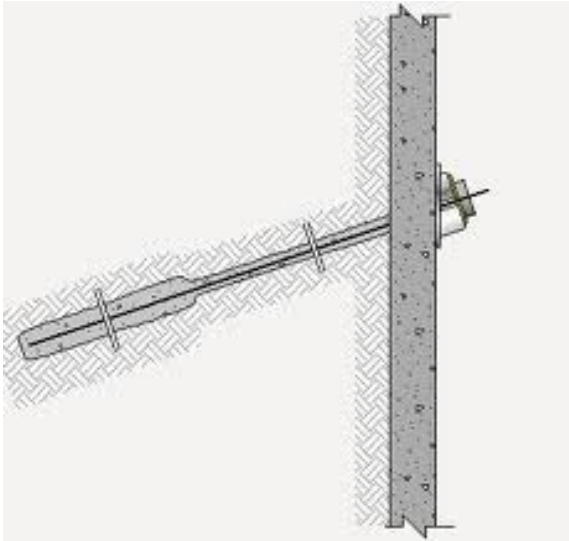
Máquina pantalladora

Detalle de cuchara de máquina pantalladora



Como quiera que las pantallas, una vez excavado su lado libre, estarán trabajando en ménsula, resulta necesario introducir algún elemento que evite que se deforme en exceso, al menos hasta que se construyan los forjados de las plantas de sótano que acodalen las pantallas.

Las soluciones más habituales son acodamientos con vigas de acero en recintos pequeños o la colocación de anclajes. Los anclajes son cables de acero en tensión y hormigonados, que sujetan la pantalla contra el terreno.



Esquema de anclaje



Recinto de pantallas con dos hileras de anclajes

Además hay otros sistemas de sostenimiento flexibles como las pantallas de pilotes, que funcionan de forma similar a una pantalla continua pero que están formados por una hilera de pilotes separados por una distancia escasa.



Pantalla de pilotes y viga de coronación



Pantalla de pilotes con anclajes

Otro sistema muy utilizado en obra civil es el denominado muro de tierra armada. Son unas placas de hormigón a las que se enganchan unos elementos metálicos y planos en su lado interior denominados flejes, quedando aprisionados por el peso de las tierras del relleno. El rozamiento impide que se desplacen los flejes y por tanto las placas.

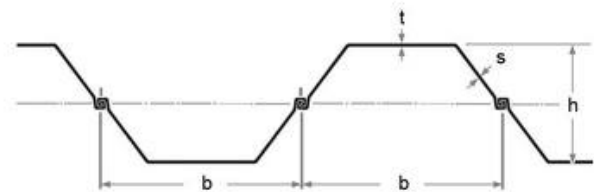


Flejes en placas de tierra armada



Acabado de muro de tierra armada

Con el mismo principio se construyen muros de tablestacas. Las tablestacas son planchas de acero dobladas con forma trapecial y enganchadas entre si.



Se clavan verticalmente y la parte que permanece hincada sostiene la parte libre, es por ello que su uso es habitual en la construcción de obras portuarias.



Muro de tablestacas



Tablestacado en márgenes fluviales

El último sistema de sostenimiento son los denominados micropilotes. Son pilotes de pequeño diámetro (entre 10 y 20 cm.) pero que se pueden hincar en cualquier dirección y que se excavan con maquinaria más reducida, capaz de trabajar en espacios pequeños. Con micropilotes se ejecutan pantallas para usos tales como protección en un frente de excavación de un túnel, o recalces de cimentaciones.

Máquina de micropilotes



5. Geotecnia vial

Se trata de estudiar las características del terreno sobre el que se van a construir infraestructuras lineales, carreteras, ferrocarriles o canales.

Obviamente junto a la infraestructura lineal, existirán elementos puntuales de cimentación de estructuras o elementos de contención como los vistos en los apartados anteriores y que requerirán un estudio pormenorizado específico.

Para la ejecución de cualquier obra pública será necesario ejecutar **Explanaciones**, entendiéndose en este término al conjunto de transformaciones al que se somete el terreno natural hasta que se ajuste a la geometría del Proyecto. Esta transformación exige conocer y valorar las características geotécnicas del terreno que pretendemos transformar, tanto en cuanto se refiere al material extraído o modificado como para el material que subyace en el terreno después de la transformación. Por tanto se deben alcanzar los siguientes objetivos:

- Conocer el material para elegir el método de excavación adecuado
- Asegurar que la explanada resultante es estable para las cargas previstas en el proyecto
- Identificar aquellos materiales que podrían utilizarse en rellenos y bajo qué circunstancias

En cuanto respecta a la explanada, tres son las condiciones fundamentales a determinar:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia mecánica
- Inalterabilidad frente a agentes agresivos

Para conformar una explanada se suele distinguir entre las zonas dónde hay que retirar material, conocidas como desmontes y las que hay que aportar material que se denominan terraplenes.

- **Desmontes**

Hay que eliminar el terreno situado entre el terreno natural y el fondo de excavación sobre el que se apoyan las capas previstas en el firme de la obra.

En este proceso se incluyen las siguientes actividades:

- Determinar el procedimiento de excavación más adecuado.

- Definir la geometría de los taludes para cada capa de material excavada, así como determinar las medidas que aseguren su estabilidad (muros, escolleras,...)
- Calificar la aptitud de los materiales excavados para su uso en terraplenes
- Clasificar la calidad de los materiales situados en el fondo de la excavación para que actúen como explanada. Evaluar una mejora de los mismos si fuese necesaria.



Estabilización de un talud con escollera

En un desmonte se puede dar el caso de que los materiales excavados sean aptos para su uso en terraplén y lo preferible es que se reutilicen en la misma obra. Si no lo fuesen deberían transportarse a vertedero o implementar sobre los mismos un proceso de mejora que los transforme en aptos. Dadas las condiciones crecientes de respeto al medioambiente, es conveniente que las obras estén equilibradas en tierras, es decir, que los volúmenes de desmonte y terraplén sean similares y es habitual que se aprovechen todas las tierras excavadas aun cuando precisen de ser mejoradas.

- Terraplenes

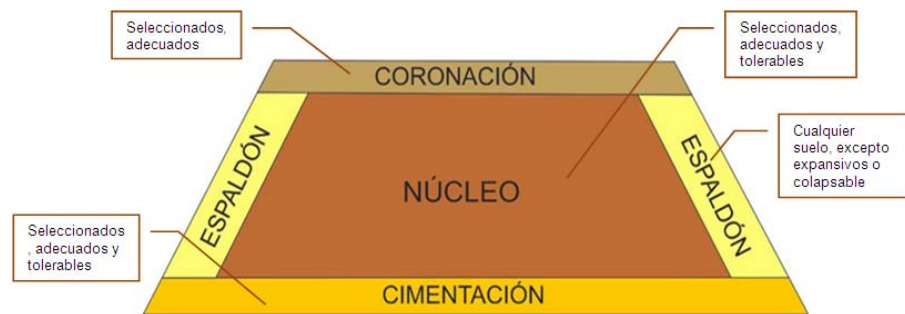
Si la rasante de la obra está por encima del terreno natural, será necesario rellenar el hueco entre ambos. Esta acción se conoce como terraplenado y al elemento construido como terraplén. Un terraplén se puede conformar con materiales obtenidos en desmontes de la propia obra o con material excavado fuera de la obra. En este último caso se denomina material de préstamo.

En un terraplén se distinguen las siguientes partes:

- Cimiento, que es la parte del terraplén en contacto con el terreno natural. En muchos casos, es necesario retirar material inadecuado (tierra vegetal) antes de iniciar el terraplén. Es la zona que soporta menor carga.

- Núcleo, que es el cuerpo principal del terraplén
- Coronación, es la zona superior del terraplén, por tanto, es la explanada que soporta el firme. Es la zona más delicada, más cargada y en la que se utilizan materiales de más calidad. Su espesor habitual es de 50 cm.
- Espaldones, son rellenos en los taludes del terraplén. Permiten plantaciones.

Esquema de zonas de un terraplén



En un terraplén, el estudio geotécnico debe definir taludes para cada material previsto, solventar las zonas problemáticas, evaluar la calidad de materiales a utilizar en cada zona y determinar los posibles préstamos si fuesen necesarios.

- Explanada

Es la zona más delicada en un movimiento de tierras porque, tanto en desmontes como en terraplenes, soporta el paquete de firmes.

La forma habitual de calificar las explanadas es por el valor del modulo de compresibilidad en el segundo ciclo del ensayo de placa de carga. Se establecen tres categorías de explanada.

CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	E2	E3
E_{v2} (MPa)	>60	>120	>300

Las obras con cargas mayores exigirán mejores explanadas, es el caso de la instrucción de carreteras, que exige explanada E3 para tráfico elevado.

Existen diversas formas de alcanzar las distintas categorías de explanada, tal y como se aprecia en el tema correspondiente a Carreteras, pero es importante considerar que el paquete de firme es menor cuanto mejor es la explanada, y

que un mismo tipo de explanada se alcanza mejor cuanto mejor es el terraplén bajo la misma.

Los suelos para su uso en explanadas o terraplenes se califican en cuatro grupos:

- Suelos inadecuados. No llegan al mínimo. No se pueden usar sin mejora.
- Suelos tolerables. Se pueden usar en núcleo y cimiento de terraplén. Cumplen diversas características, entre ellas, $CBR > 3$.
- Suelos adecuados. Aptos para coronación y núcleo. También se les exigen diversas características, entre ellas, $CBR > 5$.
- Suelos seleccionados. Los de más calidad, por ello de uso preferente en coronación. Se le exigen, entre otras, $CBR > 10$. Incluso la norma ajusta los espesores requeridos para suelos seleccionados con $CBR > 20$.

BIBLIOGRAFÍA

- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. PG-3
- Geotecnia y Cimientos. José Antonio Jiménez Salas. Tomos I, II y III. Editorial Rueda.
- Muros de contención y muros de sótano. José Calavera. INTEMAC
- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
- Cálculo de estructuras de cimentación. José Calavera. INTEMAC
- Geología aplicada a la Ingeniería Civil. Juan Manuel López Marinas. Inversiones editoriales Dossat 2000.