PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
SEPTIEMBRE 1991. SANTA FE DE BOGOTA

ANALISIS GEOMECANICO DE FUNDACIONES COMPENSADAS
(ASPECTOS ESTATICOS)

Manuel Delgado Vargas
Profesor e Investigador, Escuela Colombiana de Ingeniería.
Socio y Asesor, Consultoría Colombiana S. A.

SINOPSIS

Se presentan conceptos y criterios para orientar la aplicación de los métodos de análisis geomecánico, al diseño de fundaciones compensadas, de manera coherente con las necesidades y problemas particulares de cada proyecto. Cuando se ha juzgado necesario para la mejor comprensión de los temas, se ha hecho breve referencia a principios pertinentes de la Ingeniería de Fundaciones. Para armonizar con los objetivos de este encuentro y por motivos de espacio, se han tratado solo los aspectos estáticos, sin entrar al detalle de teorías o métodos, buscando más bien identificar criterios sobre los cuales se requiere coincidencia entre los ingenieros de suelos y estructuras, para el mejor ejercicio de las habilidades de cada especialidad.

INTRODUCCION

En el proceso completo de planeamiento, selección y diseño de fundaciones, la toma de decisiones requiere una fundamentación de ingeniería para el dimensionamiento de las soluciones y establecer la estabilidad, comportamiento esperado, constructibilidad, protección a estructuras vecinas, riesgos involucrados, etc., de las alternativas estudiadas.

Lo anterior tiene decisiva importancia en la selección y diseño de las fundaciones compensadas, en donde para anticipar un comportamiento satisfactorio, además de definir parámetros para el diseño estructural, se debe predecir la magnitud de los asentamientos, anticipar las medidas para la ejecución y control de las excavaciones, protección de los paramentos vecinos, y demás previsiones constructivas necesarias para completar la obra sin traumatismos.

El actual estado del arte en Ingeniería de Fundaciones, permite identificar un conjunto de principios y normas de buena práctica en el diseño de fundaciones, que sirven de marco a los conceptos discutidos en estas notas. En el Anexo 2, se ofrece un tratamiento conciso de los siguientes aspectos relativos a las fundaciones: requisitos básicos para su buen comportamiento, fases en su selección y diseño, Investigación de suelos, factores determi-

nantes de su tipo y diseño, y factor geotenico de seguridad.

FUNDACION COMPENSADA

Fundación compensada se puede definir, en tèrminos simplificados, como aquella en la cual el peso del edificio es aproximadamente igual al peso total de suelo incluyendo el agua, removido del sitio de emplazamiento de la base del edificio. En su aspecto geotècnico, este concepto, debe expresarse en forma màs precisa, en función de esfuerzos efectivos admisibles sobre el suelo, considerando los problemas de falla por cortante y desplazamientos del terreno, como se indica más adelante.

Según Sowers (1962) Cuando el peso de la estructura es igual al peso del suelo excavado, no habrá cambio en los esfuerzos en el suelo debajo de la estructura y por consiguiente poco asentamiento. Esto a veces se llama "flotar" el edificio, pues el peso del edificio es igual al peso del suelo desplazado, pero a menos que el suelo sea un depósito semiflúido, la analogía no es correcta.

Zeevaert (1959) se refiere a fundaciones compensadas para significar que el peso del edificio es balanceado por el peso de suelo removido.

TIPOS DE FUNDACIONES COMPENSADAS

Golder (1975) tipifica las fundaciones compensadas de la siguiente manera:

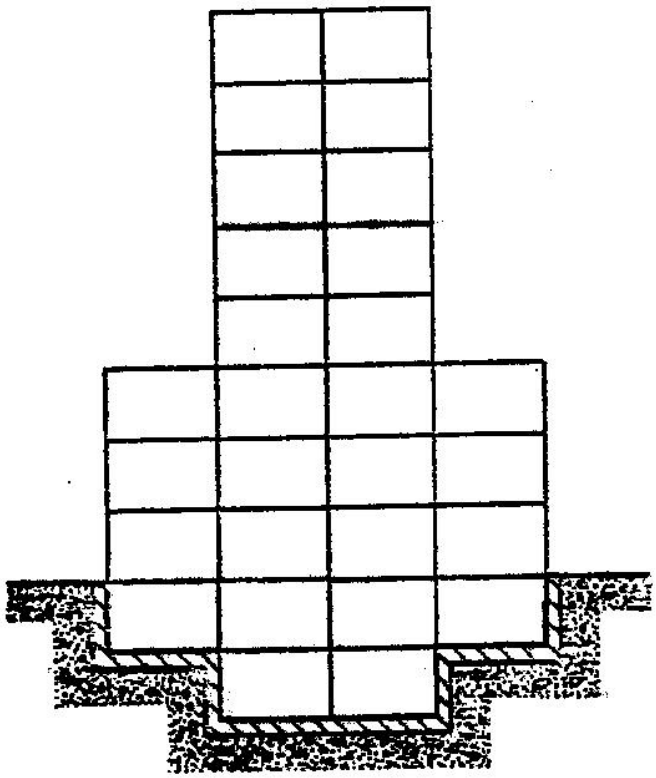
Tipo I

La resistencia del suelo de fundación es tal, que la falla por corte para las cargas del edificio no constituye un problema, pero los asentamientos, en especial los diferenciales, pueden ser tan grandes que constituyan una "falla" de las estructura. Se usa una fundación compensada para reducir los asentamientos a magnitudes tolerables. En este tipo la profundidad de fundación puede ser mayor que la profundidad de excavación, para alcanzar un estrato de fundación que superyace los mantos compresibles causantes del asentamiento.

Tipo II

La resistencia del suelo es tan baja que se presentarian fallas por cortante de suelo si el edificio se cimentara en la superficie del terreno. Si no existen capas con suficiente competencia dentro de profundidades razonables, el edificio puede cimentarse por medio de una fundación compensada para reducir los esfuerzos de corte a valores tolerables. La profundidad de fundación deberá también ser suficiente para controlar los asentamientos.

La profundidad de fundación seleccionada será compatible tanto con los esfuerzos de corte como con los asentamientos, para que ambos resulten tolerables para la estructura y su función.



Cimentación compensada

Figura 0

SITUACIONES CORRIENTES EN LA SELECCION DE CIMENTACIONES COMPENSADAS

Nunca debe suponerse desde un principio que una fundación compensada es la solución más conveniente. El problema se plantea como el de buscar un soporte idóneo para un edificio dado en un determinado sitio. No deben descartarse sin justificación soluciones posibles tales como cimientos aislados o combinados, una placa corrida o losa de fundación, pilotes, pilares o cajones autofundantes.

En el diseño de una fundación sobre un suelo débil debe considerarse toda alternativa posible de tipo de fundación. Las alternativas serán luego eliminadas una por una por diversas razones tales como asentamiento excesivo, costo, tiempo de construcción, disponibilidad de materiales, etc. Si el suelo es débil y si la magnitud de las cargas del edificio genera el peligro de falla por cortante debajo de la fundación, entonces deben considerse opciones como:

- Repartir las cargas sobre una mayor área.
- Trasladarlas a una mayor profundidad, a través de mantos débiles, a un material de fundación más resistente por medio de pilotes u otros medios.
- Reducir la carga aplicada.

Estos tres recursos pueden usarse separadamente o en forma combinada. Típicamente una secuencia de situaciones que podría llevar a seleccionar una cimentación compesada, sería:

Repartición de cargas

Cuando en la determinación del tamaño de cimientos aislados o combinados, se llegan a necesitar áreas de apoyo que obliguen a una disposición en que los bordes de los cimientos queden muy cercanos entre sí, pegados o superpuestos; la economía y ventajas estructurales conducen a considerar losas, o estructuras continuas de cimentación de gran rigidez.

Permiten controlar asentamientos diferenciales en casos como: a) El terreno de soporte exhibe compresibilidad variable por presencia de heterogeneidad, zonas sueltas o lentes compresibles, cuya disposición errática no hace viable definirlos con certidumbre y precisar una zonificación. b) Grandes variaciones entre las cargas de columnas y muros portantes adyacentes. c) La concavidad de asentamiento resultante de fundaciones flexibles involucra asentamientos diferenciales inadmisibles para la estructura.

El éxito en su diseño consiste en conferir a la sub-estructura la rigidez necesaria para controlar estos asentamientos y llegar a una distribución de presiones de contacto en la cual exista compatibilidad entre las deformaciones del suelo y las deflexiones de las estructura de fundación, es decir, se regule en

forma correcta el mecanismo de interacción suelo-estructura.

Cuando aún al considerar una alternativa de losa continua, persistan los riesgos de falla por corte del suelo o los asentamientos potenciales se juzguen nocivos, es necesario buscar otras soluciones.

Traslado de cargas a estratos profundos

Algunas combinaciones de condiciones funcionales, geotècnicas, estructurales, constructivas y económicas pueden favorecer las alternativas en base a fundaciones profundas como pilotes, pilares o cajones. Sin embargo, en especial la carencia de mantos competentes dentro de profundidades viables y condiciones geotècnicas desfavorables para la construcción, pueden en ciertos casos, hacer poco atractivas las soluciones profundas.

Reducción de la carga aplicada mediante compensación.

Una alternativa que puede suministrar la solución más eficiente y económica, consiste reducir la carga aplicada al remover permanentemente por excavación un peso de suelo igual a una fracción debidamente estudiada del peso total de la edificación y cimentar a la profundidad obtenida preferiblemente por medio de una losa o infraestructura continua de cimentación, que constituye, tal como se dijo atrás, una CIMENTACION COMPENSADA.

El principio de compensación puede ser usado en forma parcial, dejando actuar algún exceso de carga sobre el suelo, solución que de hecho es bastante corriente. Queda, sin embargo, actuando sobre los mantos de soporte un remanente de esfuerzo neto, que puede o no tolerarse según los efectos sobre la estabilidad y asentamientos de la estructura. La determinación de estos efectos constituye una parte esencial en el proceso de definir la disposición y diseño de una cimentación compensada.

Si después de este proceso la fundación compensada permanece como una solución posible al problema, entonces podria procederse a su diseño. Dado que la construcción es en general el aspecto más difícil de una fundación compensada, deben considerarse conjuntamente los problemas de diseño y construcción.

En sentido amplio la compensación consiste en el balance total o solo parcial de pesos, y la propia fundación puede se un conjunto de cimientos aislados, losa de fundación, caja rigida, pilotes, pilares, o en algunos casos una combinación de ellos. La combinación de una losa de fundación y pilotes representa una solución muy atractiva en variadas condiciones de complejidad de fundación en mantos débiles, cuyo tratamiento está por fuera del alcance de estas notas y es tema de otra conferencia en este encuentro.

PANORAMA GENERAL DEL USO DE FUNDACIONES COMPENSADAS EN SANTA FE DE BOGOTA

Como es bien conocido, las fundaciones compensadas se han usado

ampliamente en Santa Fe de Bogotá para controlar asentamientos excesivos provenientes de la consolidación de mantos arcillo-limosos blandos, constitutivos de secuencias sedimentarias de origen lacustre, formación dominante en extensas áreas de la Sabana de Bogotá. En la ciudad su mayor incidencia ha sido en los sectores norte y occidente, sin embargo, una distribución más precisa se puede consultar en algunos trabajos realizados de sectorización del subsuelo orientados a la cimentación urbana.

Los problemas de excavación y protección de construcciones vecinas cuando las profundidades exceden los 3 a 4 metros, han llevado a utilizar fundaciones profundas tipo pilote, en forma exclusiva o combinados con losas de fundación. En sectores cercanos al piedemonte de los cerros orientales, es viable encontrar soporte para tales fundaciones, en arcillas o arcillolitas duras de la denominada comúnmente como "Formación Bogotá", que obedecen a denominaciones diferentes y discriminaciones más complejas desde un punto de vista geológico. También se usan con frecuencia mantos de espesor limitado o lenticular de arenas y mezclas de arcilla, arena y grava con bloques de arenisca.

Las grandes profundidades de excavación requeridas para compensar adecuadamente las cargas de edificios altos, ha llevado a adoptar soluciones profundas o combinadas con compensación parcial en la casi totalidad de los grandes edificios de la ciudad, ubicados en el centro y norte, en sectores relativamente cercanos a los cerros.

El empleo de fundaciones compensada acusa cierta dependencia del desarrollo de la Ingeniería de Suelos en Colombia. Hasta los años sesenta, dominó el uso de pilotes para cimentar edificios siempre que se anticipara el riesgo de asentamientos. A partir de entonces, con la disponibilidad de métodos mejorados de exploración de subsuelo y laboratorio, y mayor confianza en el uso de la Mecánica de Suelos para predecir asentamientos, se utilizaron con mayor frecuencia las fundaciones compensadas, en situaciones en donde antes solo se hubieran usado pilotes.

La experiencia en el comportamiento de las fundaciones compensadas no ha sido siempre positiva, lo cual conjuntamente con las dificultades y costo de las excavaciones profundas, ha motivado una tendencia creciente a usar soluciones combinadas losa-pilote. El comportamiento de estas fundaciones se puede racionalizar en mejor forma si se utilizan las técnicas modernas de caracterización del subsuelo con base en ensayos in situ, y se emplean las herramientas computarizadas de análisis para evaluar la interacción suelo-estructura, especialmente compleja en fundaciones del tipo tratado.

COMPORTAMIENTO Y RESPUESTA DEL SUELO

El comportamiento del suelo respecto a su caracterización, respuesta y análisis geotécnico, constituye un factor primordial para precisar conceptos y magnitudes determinantes del diseño de una fundación compensada, tales como: profundidad de fundacion,

predicción de asentamientos y deformaciones esperadas, distribución de presiones verticales y laterales para el diseño estructural, manejo de la excavación y construcción de la fundación, protección de estructuras y servicios vecinos, y planteamiento del programa de observación y control del comportamiento.

Son invaluables las experiencias de Zeevaert en Méjico, en el diseño y ejecución de fundaciones compensadas en condiciones extremas de complejidad geotècnica, entre las cuales la fundación de la Torre Latinoamericana constituye un modelo no superado del uso de una fundación compensada combinada con pilotes, sometida con éxito a prueba de solicitaciones sísmicas rigurosas. En los siguientes apartes se han seguido algunos de sus planteamientos sobre aspectos fundamentales, incluidos en un informe sobre el estado del arte en el diseño de fundaciones compensadas de 1972.

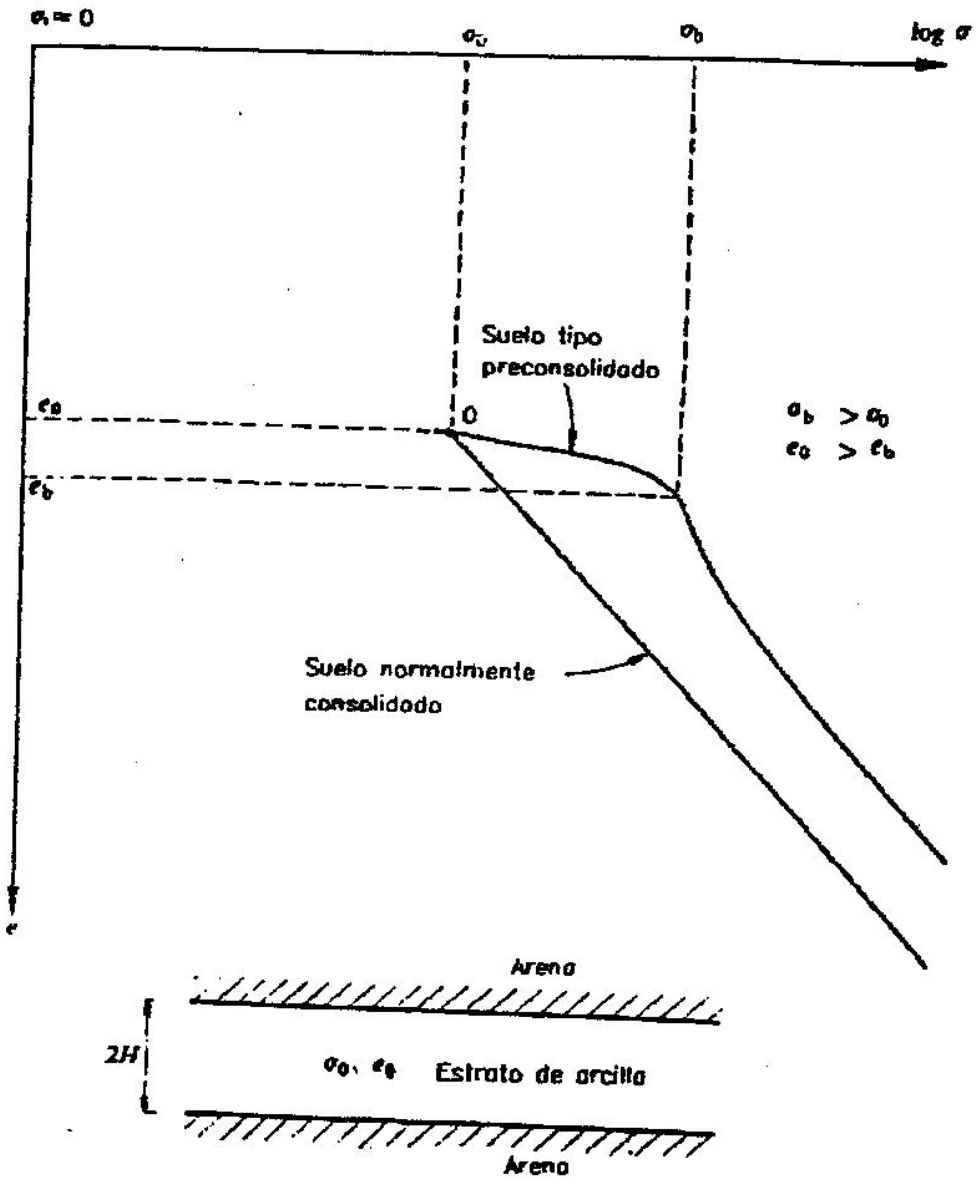
Cuando una fundación compensada formada por una caja rigida y estanca se coloca a una profundidad "d" bajo la superficie del terreno, se dispone de un esfuerzo total disponible para compensar la carga del edificio que es igual a:

$$Pd = (\text{Esfuerzo efectivo})d + (\text{Presión del agua})d$$

El primer tèrmino define el esfuerzo en la estructura del esqueleto del suelo, y el segundo la presión en la fase líquida que llena los vacíos. Esta identificación de dos esfuerzos de naturaleza diferente, componentes del esfuerzo total en una masa de suelo, constituye uno de los pilares conceptuales de la Mecánica de Suelos. No obstante su simplicidad a primera vista, involucra implícitamente el comportamiento del subsuelo, fuertemente dependiente del primer tèrmino, e intimamente ligado a la formación e historia de los depósitos de suelo y a sus propiedades mecánicas, hidráulicas y estratigráficas.

El criterio aplicable al seleccionar los parámetros mecánicos del suelo para el diseño de la cimentación, es función de si el depósito, en el intervalo de profundidades controlante del comportamiento, se va a comportar como normalmente consolidado o como pre-consolidado. El comportamiento de los suelos desde el punto de vista de su compresibilidad permite precisar el mecanismo de compensación y debe permitir afinar los criterios para diseñar cimentaciones compensadas, en cada caso particular.

De los resultados de un ensayo de consolidación en el laboratorio, ver Figura 1, al graficar una variable representativa del cambio volumètrico, como es la relación de vacios, en función del logaritmo de los esfuerzos causantes de la consolidación, se obtiene la denominada CURVA DE COMPRESIBILIDAD. Son evidentes dos partes en esta curva: se inicia con una rama de muy bajas pendientes negativas, significativas de baja compresibilidad, luego pasa en forma rápida, formando una especie de quiebre, a una rama cuasi-recta de alta pendiente negativa, que representa alta compresibidad. La abscisa de un punto cercano al de mayor cambio de curvatura de la gráfica define un valor o umbral crítico en el esfuerzo de consolidación.



Compresibilidad en condiciones de campo
Figura 1

En un depósito normalmente consolidado, este esfuerzo crítico se presenta muy cercano al esfuerzo efectivo resultante del peso de los mantos superyacentes, σ_o, al nivel considerado. Por consiguiente, un pequeño incremento de esfuerzos, producido por la cimentación, ubica los esfuerzos sobre la rama de alta pendiente en donde la alta compresibilidad es responsable de grandes cambios de volumen y por consiguiente, de grandes desplazamientos verticales.

En un depósito preconsolidado, el esfuerzo por mantos del suelo es notoriamente inferior al valor crítico en el quiebre de la curva, σ_o. Sin embargo, cuando el incremento de esfuerzos por la fundación, sobrepasa así sea ligeramente el umbral crítico, el fenómeno es similar a la condición de consolidación normal. En este caso, sin embargo, existe un margen mayor para los incrementos de esfuerzos por la fundación en condiciones de compresilidad es moderada ($\sigma_o - \sigma o$).

El comportamiento del suelo, descrito, en el caso de suelos de alta sensitividad, debe ser cuidadosamente considerado al diseñar cimentaciones compensadas. En estos materiales en especial, las pendientes de la rama de la curva de compresibidad al sobrepasar el punto de quiebre son altísimas (cuasi-verticales), en consecuencia los esfuerzos en esta zona conducen a muy grandes desplazamientos verticales, ocurriendo una especie de colapso, lo que explica asentamientos importantes observados en casos de moderados incrementos de esfuerzos por encima del umbral crítico.

En el caso de fundaciones totalmente compensadas, no existe problema de capacidad de carga de la cimentación cuando se compensa en función de esfuerzos efectivos existentes y presiones de agua. Es importante, sin embargo, considerar que en el caso de momentos de volcamiento producidos por fuertes cargas de viento actuando sobre el edificio, pueden producirse altos esfuerzos en los bordes de la cimentación, y si el suelo tiene baja resistencia al corte, pueden presentarse fallas locales. La consecuencia no debe pasarse por alto, pues el edificio puede quedar inclinado después de un sismo o de un viento huracanado. Esta consideración evidencia la necesidad de investigar la capacidad portante de los materiales del subsuelo que soportan una fundación, así sea totalmente compensada.

PROFUNDIDAD CRITICA

En fundaciones tipo II la resistencia al corte del suelo es baja y hay un límite teórico para la profundidad a la cual se puede hacer una excavación. El enfoque teórico a este problema está bien establecido y es bastante adecuado para efectos prácticos.

Terzagui (1943) propuso el primer enfoque básico para este problema, con fundamento en un modelo similar al de falla por corte generalizado del suelo portante, de un cimiento superficial en arcilla. Skempton (1951) dió una solución más precisa al problema de la capacidad portante de cimientos en arcilla que considera el

ancho (B), largo (L) y profundidad (D) de la cimentación. Bjerrum y Eide (1956) probaron su sugerencia de que el inverso de tal mecanismo pudiera usarse para excavaciones en arcilla por medio de su comparación con fallas reales en excavaciones y la encontraron correcta.

Por medio de estos métodos elementales se puede determinar la máxima profundidad de excavación. Sin embargo, existen evidencias de que este valor se puede exceder algo en ciertos casos si:

- no hay edificios en la vecindad que puedan dañarse por posibles desplazamientos laterales;
- la arcilla tiene una costra más dura que puede "reforzar" el conjunto de mantos resistentes;
- el entibado horizontal de la excavación es bastante rígido.

El soporte de los lados de la excavación puede ser difícil en fundaciones del tipo II.

LEVANTAMIENTO DEL FONDO DE LA EXCAVACION

La hechura de la excavación para la fundación a la profundidad requerida reduce la esfuerzo vertical en el suelo bajo la fundación. Esto ocasionará levantamiento del fondo de la excavación. Cualquier levantamiento que ocurra se invertirá y convertirá en asentamiento durante la construcción del edificio. Esto no puede evitarse. Existen sin embargo formas de minimizarlo y controlarlo.

Existen tres posibles mecanismos de levantamiento. a) movimiento elástico cuando el suelo superyacente se remueve. b) en una excavación que permanece abierta por cierto tiempo habrá un hinchamiento gradual en el suelo e incremento en el contenido de agua por reducción de el esfuerzo. c) En una excavación que se aproxima a la profundidad crítica habrá tendencia a movimientos plásticos hacia adentro del suelo aledaño. El obvio que este último debe evitarse en el diseño.

Para obtener un comportamiento satisfactorio de una fundación compensada es importante reducir grandes expansiones del fondo, asentamientos subsiguientes y movimientos laterales de la excavación. El flujo plástico hacia el fondo de la excavación, también produce expansión, adicional a la respuesta elástica del suelo. Cuando la excavación es profunda, se genera flujo plástico y viscoso hacia ella, deteriorando seriamente el suelo bajo la cota fundación. Aumentará la compresibidad y en forma correspondiente los asentamientos. La resistencia al corte se reducirá, quedando el suelo en condiciones desfavorables para resistir solicitaciones severas originadas en cargas laterales de viento, sismo y excentricidades de las cargas sobre la base.

Los cálculos de las expansiones son en principio similares a los

cálculos de asentamientos pero se usan módulos de elasticidad o de compresibilidad correspondientes a rangos de descarga en los ensayos pertinentes.

Además de las predicciones en base a las características esfuerzo-deformación, el levantamiento deberá siempre medirse durante la excavación por medio de un programa de instrumentación debidamente previsto.

los mètodos para controlar el hinchamento son:

- Excavación total hasta profundidades en donde sea pequeña avanzando luego en trincheras angostas y aplicando compensadamente las cargas para controlar la expansión.

- Depresión del nivel freático durante el proceso de excavación, para aumentar el esfuerzo de confinamiento sobre los mantos que tienden a expandirse.

- Uso de pilotes de fricción.

- Rapidez de construcción, en la ejecución de la excavación y en la aplicación de cargas.

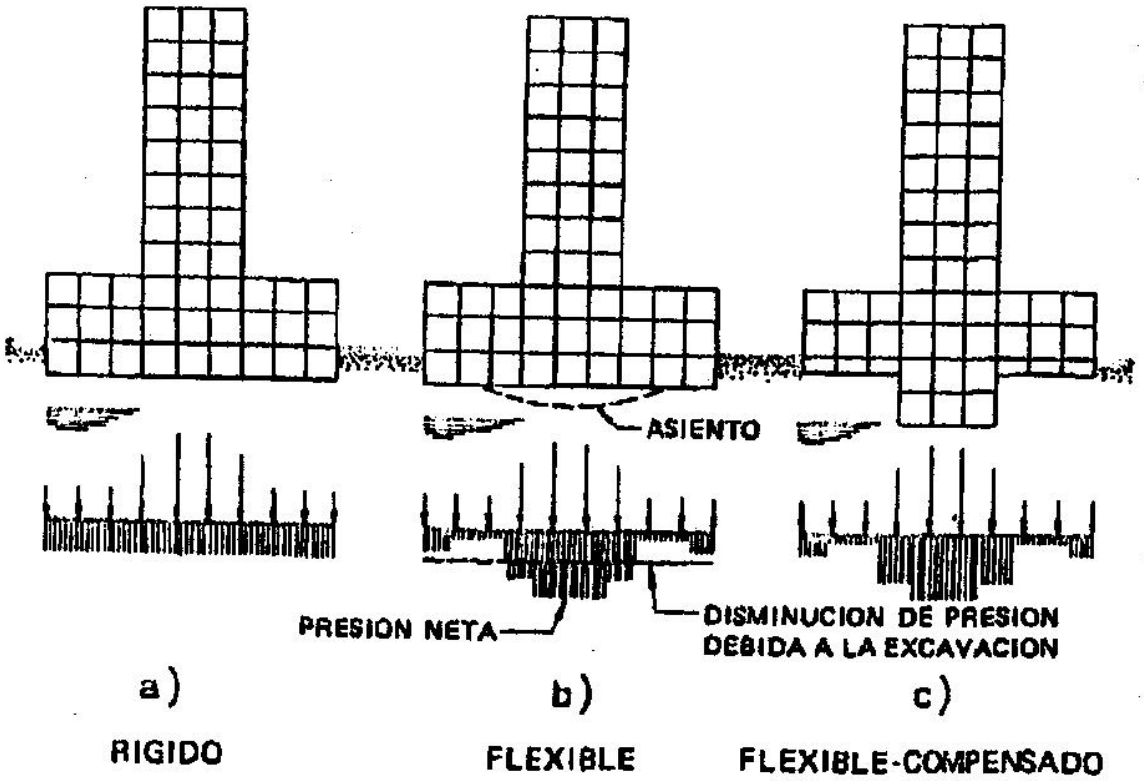
ASENTAMIENTOS

Los asentamientos dependen de la distribución de las presiones de contacto, determinada por el tipo de suelo, geometría del área cargada, de la rigidez relativa fundación-suelo y del nivel de cargas actuante. En terrenos compactos o firmes la distribución presenta concentraciones mayores pero suavizadas, ver figura 3, debajo de las cargas concentradas, mientras que en suelos blandos la distribución puede considerse plana, ver figura 4.

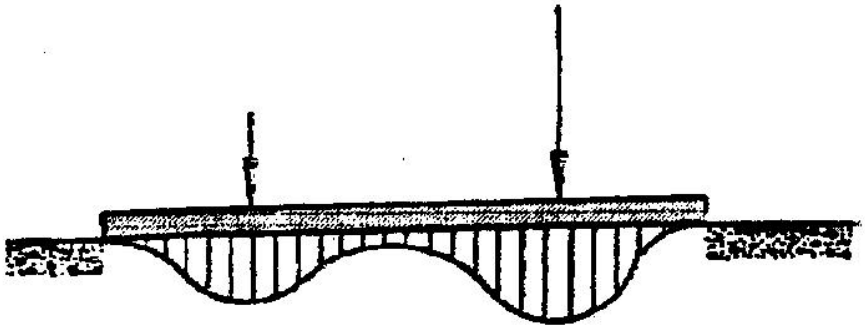
No deben ignorarse, sin embargo, otros factores como los indicados en la figura 5, que pueden influir notablemente sobre la distribución de presiones y las condiciones de trabajo de la fundación. En efecto, el asentamiento diferencial de la superficie cubierta por la losa refleja, en forma general, las variaciones de compresibilidad del subsuelo.

El problema más complejo se presenta cuando se deben cimentar zonas del edificio muy diferentemente cargadas, como en el caso de torres elevadas rodeadas de alas o bloques con número de pisos sustancialmente menores, ver Figura 2. En el caso de placas sobre arcillas compresibles, no obstante que se logre una compensación completa entre peso del edificio y peso de suelo excavado, subsiste el problema de distribución desigual de esfuerzos sobre el suelo, lo que puede generar asentamientos diferenciales inadmisibles. Las alternativas para manejar este problema se pueden polarizar entre las siguientes opciones:

a - Estructura de fundación suficientemente rígida que produzca un efecto "puente" y permita considerar una distribución seudo-uniforme de el esfuerzo sobre el suelo.

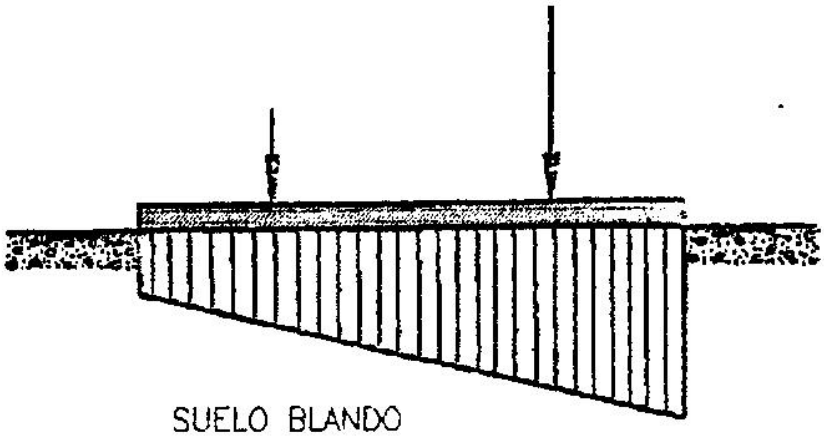

ASIENTO
PRESION NETA
DISMINUCION DE PRESION
DEBIDA A LA EXCAVACION
a)
RIGIDO
b)
FLEXIBLE
c)
FLEXIBLE-COMPENSADO

Figuro 2.



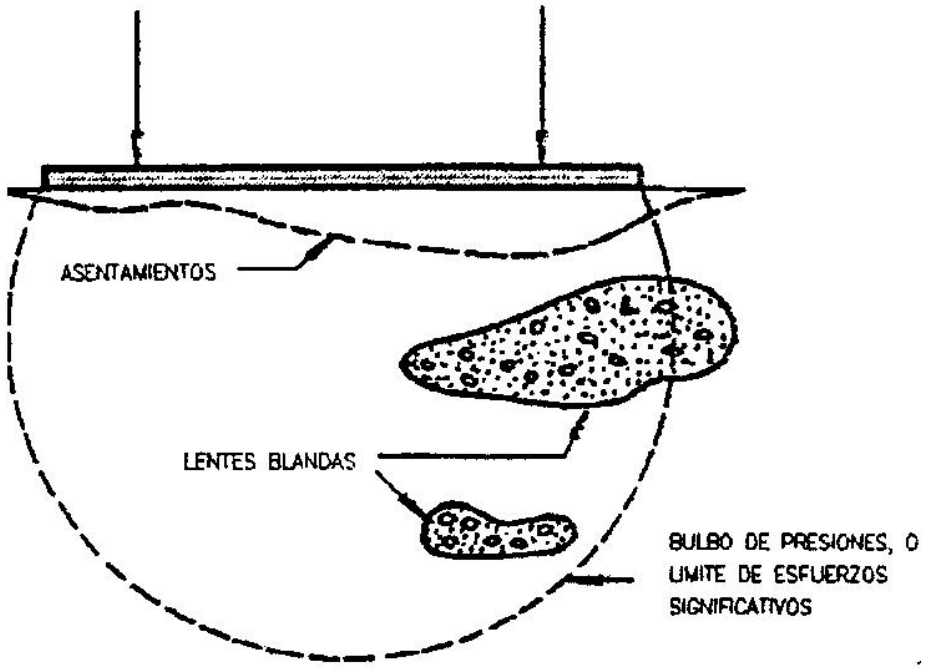
SUELO RIGIDO

Distribución de esfuerzos bajo losas
Figura 3



SUELO BLANDO

Distribución de esfuerzos bajo losas
Figura 4



Factores que afectan la distribución de esfuerzos
Figura 5

Las concentraciones de cargas actuantes someterá la estructura a momentos flectores muy grandes y por consiguiente soluciones estructurales que pueden llegar a ser prohibitivas económicamente.

b - Estructura flexible de fundación, caso en el cual la reacción de cada una de las partes de la placa es aproximadamente igual a la carga que actúa sobre las misma y los momentos flectores son relativamente pequeños. La alta concentración de cargas en las partes más cargadas hará que la compensación sea apenas parcial, y por consiguiente se presentará un asentamiento mayor que en las partes menos cargadas que resultan sobre-compensadas. Resulta inevitable que se presente un asentamiento diferencial que produce distorsiones en la estructura del edificio y tensiones que pueden resultar inadmisibles según la magnitud de dicho asentamiento diferencial. La disposición de juntas de construcción entre la torre y las zonas más bajas mejora ligeramente las condiciones de tensión en los soportes de la superestructura, pero no llega a impedir el asiento diferencial y la inclinación de las alas hacia la torre. Por ello, es necesario efectuar un cálculo de asentamientos para determinar si el asentamiento diferencial puede llegar a exceder el valor que la estructura es capaz de soportar sin que se produzcan desperfectos en las misma. Si el asentamiento diferencial es excesivo se tiene que elegir entre dos alternativas: utilizar una opción que considere el uso de los pilotes o pilares o proyectar sótanos de diferente profundidad para la torre y las alas, que constituye la opción (c).

c - Utilizar sótanos de diferente profundidad para que la compensación de cada parte produzca asentamientos teóricamente iguales. En contra de los buenos resultados de esta medida atentan los efectos de levantamientos del fondo de las excavaciones y las subsiguientes recompresiones bajo carga. Por consiguiente esta alternativa debe ir acompañada de las medidas constructivas para minimizar estos efectos.

ASPECTOS ESTRUCTURALES

La estructura de la fundación deberá diseñarse para resistir reacciones hacia arriba del terreno producidas por el peso total del edificio, incluyendo el peso de la fundación. Este esfuerzo global sobre el piso de soporte puede ser bastante elevado a pesar de que el esfuerzo neto sea posiblemente nulo, como en condiciones de compensación total. La distribución de esta esfuerzo dependerá del efecto de interacción suelo-estructura. Un valor promedio se obtendría al dividir las cargas totales mencionadas por el área en planta de la fundación, valor que a veces se usa para un diseño simplificado bajo la hipótesis de distribución uniforme de esfuerzos de contacto.

Deberá hacerse un ajuste cuidadoso de la disposición en planta del área de contacto de la fundación, para aproximarse al óptimo deseable de que la resultante de las cargas coincida con el centro de gravedad de área de contacto de la fundación. Los efectos que se originan en las desviaciones de la aplicación de esta norma, pueden llegar a ser críticas bajo ciertas condiciones, lo que obliga a evaluarlos y tomar las medidas compensatorias cuando sean necesarias.

Son varios los motivos que justifican el darle la debida importancia a la aplicación de esta norma: a) Los asentamientos inevitables generan la menor nocividad cuando son uniformes. b) No obstante que la compensación sea total, una distribución no uniforme, de tipo trapezoidal, ver figura 4, de los esfuerzos de contacto puede originar que sobre la zona más fatigada se sobrepasen los niveles tolerables de esfuerzos y se produzcan asentamientos diferenciales. c) Los asentamientos diferenciales introducen distorsiones en la estática del conjunto estructura-fundación.

Efectos imprevistos de superposición de presiones por estructuras contiguas, amarre o continuidad estructural inapropiados y juntas deficientes, pueden modificar la distribución de presiones asumida en base a coincidencia de centroides, generando excentricidades de la resultante de cargas. En el caso de cargas de gran magnitud como en edificios altos o equipos industriales pesados, aún excentricidades en apariencia moderadas, pueden conducir a grandes momentos sobre la fundación generando presiones desiguales que producen asentamientos diferenciales.

En ciertos casos estos asentamientos diferenciales conducen a ladeamientos de la estructura que tienden a amplificar la excentricidad de las cargas, efecto que puede adquirir caracteres críticos y crear problemas de costosa corrección, cuando el centro de gravedad de las cargas verticales es elevado respecto al nivel de fundación.

Los problemas de coincidencia de centroides llegan a ser complejos y posiblemente, prácticamente insolubles, cuando las losas en planta se alejen de las formas cuadrada, circular o rectangular. De hecho, cuando la forma no es simétrica respecto a dos ejes ortogonales tales como disposiciones trapezoidales, triangulares, en T, L, etc, es necesario recurrir a soluciones complejas, que pueden fallar si en la realidad no se satisfacen las hipótesis de partida supuestas, por ejemplo, respecto a distribución de las cargas, asentamientos, funcionamiento de juntas etc. En estos casos es preferible proyectar juntas de construcción que independicen sectores de losa, aproximandolos a su forma ideal cuadrada o circular.

Cuando se requiera dar formas complejas a las losas y usar juntas de construcción, los análisis de suelos y estructural han de ser muy rigurosos para lo cual es necesario:

- Precisar los parámetros del suelo por medio de investiga-

ciones detalladas de laboratorio y ensayos in situ, si la erraticidad relativa del suelo permite llegar a valores confiables.

- Usar métodos refinados de análisis, en caso necesario considerando la interacción suelo-estructura, basados en las opciones disponibles en la actualidad por medio del computador en base a diferencias finitas, elementos finitos o de frontera, ecuaciones integrales, etc..

- Programar, instalar y operar sistemas eficientes y confiables de control de comportamiento en la obra. Si es pertinente, utilizar el método observacional para aplicar acciones correctivas y aun modificadoras de los procesos constructivos y ajustes en los diseños, durante el desarrollo de las obras.

- Evitar acciones constructivas que alteren y modifiquen las condiciones iniciales de los suelos e invaliden la capacidad de predicción de los análisis geomecánicos.

Se seguirán criterios similares, cuando se trate de cimentar partes muy diferentemente cargadas, que producirían asentamientos y giros relativos diferenciales importantes.

En cualquiera de estos casos que obliguen a proyectar dichas juntas de construcción, es claro que deberá hacerse un estudio detallado de los efectos relativos entre unas y otras, con el objeto de comprobar que los asientos y giros diferenciales resultan admisibles y proyectar en su caso, en forma correcta todos los elementos que deben comunicar entre si los diferentes bloques (pasillos, ductos y conexiones para servicios diversos).

Incidencia de la rigidez de la super-estructura en la interacción suelo-estructura

Si se considera que los elementos de la super-estructura pueden impedir los movimientos de la cimentación, calculados como si solo existiera esta, se deberia realizar un análisis conjunto estimando de alguna forma la colaboración super-estructura-cimentación. De esta forma, resultarían unos esfuerzos suplementarios en la super-estructura y un alivio en los elementos de la cimentación, obteniendo mayor aproximación entre los asentamientos previstos y los reales.

La rigidez conjunta para este tipo de análisis deberá incluir la inercia de la losa de cimentación más las suma de las inercias de las estructuras de entrepiso que colaboren significativamente. Si este último valor es muy pequeño comparado con la inercia de la losa, podría prescindirse de la colaboración de la super-estructura y suponer que con que se satisfagan los límites de asentamientos diferenciales normalmente admitidos, el comportamiento de la estructura será correcto.

Si la rigidez de la super-estructura es grande comparada con la

de losa, se pondrá contar con la colaboración citada, introduciendo en los análisis la rigidez conjunta losa-super-estructura.

ESTUDIO DE SUELOS

Si uno de los motivos de considerar una cimentación compensada, es la presencia de mantos débiles y compresibles, se llega a los umbrales de esfuerzos admisibles, cuya determinación al aplicar criterios de seguridad, buen comportamiento esperado y economía, exige un conocimiento perfeccionado de las características geomecánicas de los mantos involucrados.

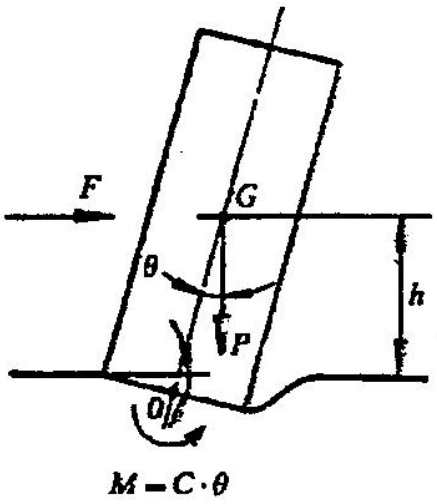
Es muy conveniente que se programe una etapa preliminar de investigación del subsuelo, que además de contribuir a que en el proyecto se consideren factores vinculados a la fundación, permita definir los puntos de interès y concretar el programa de investigaciones de detalle. Los sondeos, reconocimientos y ensayos tendrán un cubrimiento y profundidad que garantice que sean suficientemente estudiados, todos los mantos del terreno que puedan verse involucrados por la construcción y cambios en el régimen de esfuerzos.

La profundidad será fijada en cada caso particular en función de factores tales como geología y características del terreno y del edificio, altura de sótanos, posibilidad de fundaciones piloteadas, potenciales problemas constructivos, experiencias locales, etc. En áreas construidas se requiere hacer una investigación de las edificaciones de los edificios colindantes, sótanos, ductos y redes de servicio, y cualquier elemento que pueda verse afectado por la nueva obra. Se destaca la necesidad de determinar los módulos estáticos de deformación del suelo así como los módulos dinámicos de compresión y cortante.

ESTABILIDAD DE LAS FUNDACIONES DE EDIFICIOS ALTOS

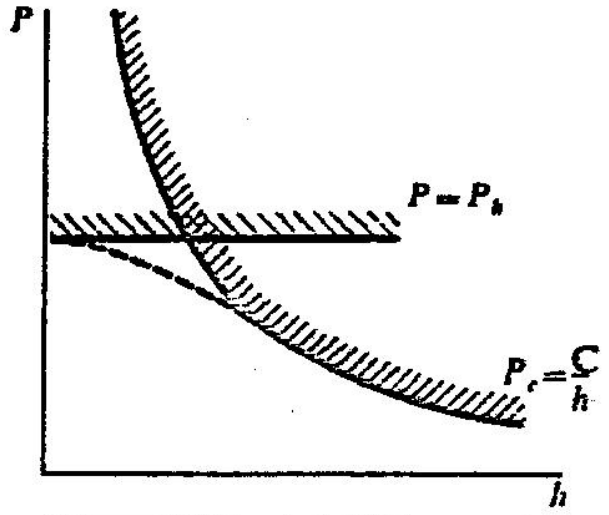
Las construcciones muy esbeltas apoyadas en el suelo, pueden llegar a ser inestables por esfuerzos transmitidos inferiores a los esfuerzos límites calculados con las fórmulas usuales de la Mecánica de Suelos. Constituye un proceso de inestabilidad similar al pandeo, originado en excentricidades de la resultante de las cargas respecto al centroide del área de soporte de la fundación. Un empleo estudiado de fundaciones compensadas solas o combinadas con pilotes, puede aportar alternativas atractivas para la solución de este problema.

El principal mecanismo responsable del fenómeno es el par sobre la base generado por la inclinación del eje vertical del edificio que pasa por el centro de gravedad de su peso, ver Figura 6. Si θ es el ángulo en radianes de inclinación del edificio, y h es la altura del centro de gravedad del peso, aproximadamente el brazo del par sobre la base será $h.\theta$, y el par: $P.h.\theta$. El terreno reacciona con un par, que se puede considera proporcional a θ, que tiene un valor límite $C.\theta$, función de las características elasto-plásticas del suelo de soporte.



Fenómeno de inestabilidad

Figura 6



Dominio de estabilidad

Figura 7

Aún en el caso de cargas horizontales nulas sobre el edificio, en el equilibrio: P.h = C, igualdad que permite definir un valor crítico de la altura del centro de gravedad, Hc = C/P. Si h es mayor que la altura crítica, Hc, el edificio estará en una situación en que el par por inclinación agota la capacidad del suelo para resistir giro (par C.θ), y las acciones horizontales de viento y sismo generan momentos en condición de desequilibrio y de gran riesgo para la estabilidad del edificio.

Para cada valor de "h" y la constante de reacción de un suelo dado "C", la expresión de arriba se puede escribir como Pc = C/h, que supone un valor límite de la carga del edificio que produce la inestabilidad. En un gráfico cartesiano de ejes h y P, el dominio de validez quedaría definido por el área comprendida emtre los ejes y la hipérbola Pc = C/h, Figura 7. Además, otra cota superior de cargas estaría dada por la carga de hundimiento Ph, determinada por las fórmulas usuales. En el gráfico estaría representada por una recta de ecuación P = Ph. El dominio de validez real sería una curva de compatibilidad entre las dos expresiones límites.

DISTRIBUCION DE LAS FUERZAS HORIZONTALES SOBRE EL SUELO

Los grandes esfuerzos horizontales generados en los edificios altos, se transmiten a través de los elementos portantes verticales a la cimentación y de esta al terreno.

Si el edificio dispone de varios sótanos en contacto directo con el suelo, los mecanismos de trasmisión de estos esfuerzos laterales al suelo serán los siguientes:

1. Presión lateral del suelo contra los muros o pantallas.
2. Cortante transmitido por la base de la estructura.
3. Resistencia lateral de elementos tipo pilote, en el caso de soluciones combinadas.

Para determinar de que forma colabora cada sistema en la resistencia total, sería imprescindible disponer de un estudio completo que tuviera en cuenta las deformaciones de cada elemento para una misma carga y el cumplimiento de las compatibilidades de deformación de todos ellos entre si y con la estructura. Aún adoptando suposiciones simplificadas se llega fácilmente a modelos de gran complejidad e indeterminación, que implica recurrir a mètodos numèricos como los de elementos finitos en base a una caracterización muy rigurosa del suelo, si se espera de ellos que suministren datos realistas.

Si no resulta viable implementar un modelo global, en la práctica se pueden estudiar por separado los distintos sistemas, estimando la máxima resistencia que aporta el menos deformable, y comprobando que al sumar los otros se tiene el coeficiente de seguridad suficiente, sin que se produzcan movimientos superiores a los admitidos.

Si el conjunto de la estructura de los sótanos forma un sistema rígido, prácticamente indeformable, la colaboración del terreno se tendrá en cuenta en la práctica, bajo la hipótesis de una traslación nula, a no ser que el giro que toma la cimentación por las fuerzas horizontales produzca un ladeamiento general de la caja del sótano que inducirá empujes de tierra y un reajuste, por lo tanto, del momento actuante sobre la cimentación.

Si la estructura del sótano es muy flexible se podrá producir una traslación horizontal compatible con la estructura que aumente la respuesta del terreno.

En cualquier caso será imperioso comprobar que no existe posibilidad de que en futuro sean retiradas las tierras que contribuyen a la estabilidad lateral del conjunto.

EFECTOS DE LA CONSTRUCCION SOBRE ESTRUCTURAS VECINAS

Siendo las edificaciones en altura con cimentaciones compensadas, construcciones que tienen grandes y profundos sótanos, instalados con frecuencia en zonas de elevada densidad de construcción, se podrán presentar incidencias notablemente nocivas en las estructuras colindantes tanto durante la construcción como posterior a ella, cuando las fuertes cargas de la nueva edificación modifiquen considerablemente el régimen de esfuerzos del suelo.

En particular, los aspectos principales por considerar serían: grandes excavaciones, levantamientos del terreno, depresiones del nivel freático, efectos dinámicos por hinca de pilotes, movimientos horizontales del terreno, empujes laterales o rozamientos negativos en pilotes existentes, asentamientos de todo tipo, etc.

Los levantamientos del terreno se tratan en otros apartes de estas notas. Si se considera, además, la especial incidencia que tienen las excavaciones en el presupuesto total del proyecto, en la programación de la obra, y plantear problemas técnicos complejos, se incluirá un resumen de conceptos derivados de experiencias europeas, tomado de la referencia [1]. En Anexo 1, se incluyen conceptos sobre los movimientos característicos de las excavaciones, tomados de la misma referencia.

Incidencia de las excavaciones en las construcciones vecinas

La influencia de las excavaciones sobre las edificaciones próximas es un problema importante, más común y serio de lo que generalmente es reconocido en la práctica, en el momento de anticipar las medidas de protección y prever los desembolsos para su estudio y ejecución.

Los desplazamientos dependen de factores tales como la rigidez del muro de soporte lateral, las dimensiones y profundidad de la excavación, las características del terreno subyacente y el tipo de apuntalamiento o anclaje. Los problemas más serios se producen generalmente cuando se presentan suelos dbiles y compresibles.

La excavación en arcillas blandas y medias causa los movimientos más importantes y perjudiciales.

Para evitar problemas y tomar decisiones bien fundadas toda obra de excavación de cierta importancia en sitio urbano, debe de estar precedida de un estudio del suelo.

Además de establecer el sistema de construcción más aconsejable, los estudios del proyecto deben permitir predecir la cantidad de movimiento que puede ocurrir y sus consecuencias, así como establecer medidas para limitar o evitar los movimientos. De esta forma, podrán reducirse los posibles daños y evitar las costosas demandas judiciales, retrasos en la construcción, accidentes, etc.

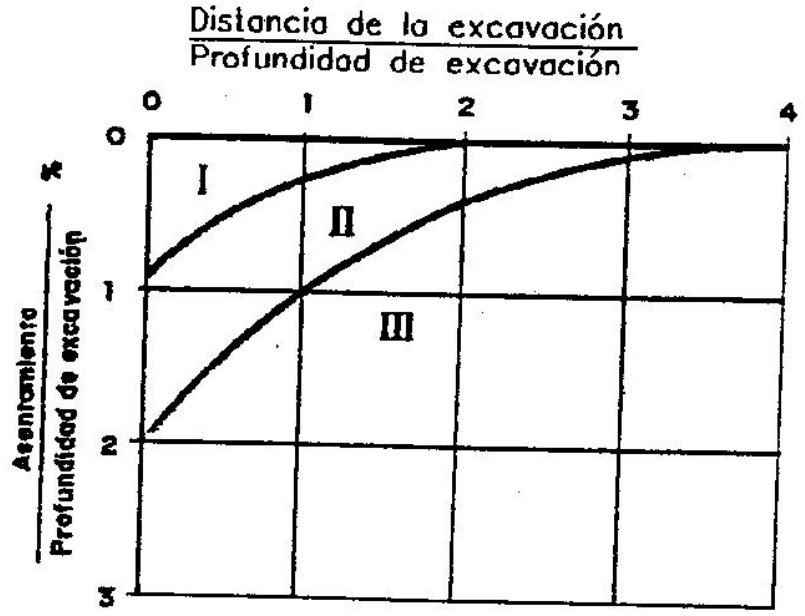
Siguiendo algunas orientaciones ratificadas por la práctica, en los proyectos de grandes excavaciones pueden evitarse en la mayoría de los casos excesivas deformaciones y en consecuencia, daños en los edificios vecinos.

Los corrimientos de las zonas próximas a la excavación no pueden evitarse por completo ni siquiera cuando se hayan adoptado toda clase de medidas de seguridad y se hayan realizado perfectamente todos los elementos de la misma. Estos movimientos provienen de deformaciones elastoplásticas del suelo que llegan a influir en superficie de 2 a 4 veces la profundidad de la excavación, ver figura 8. En contraposición a los corrimientos o asientos puramente locales que pueden originarse por una incorrecta ejecución del muro o de los anclajes, estas deformaciones por cambio tensional del terreno no ejercen influencia perjudicial significativa sobre las edificaciones vecinas, según ha demostrado la actual experiencia cuando sus órdenes de magnitud no superan los 1 a 3 cm. Para que las deformaciones de los muros no alcancen valores elevados, deberán tenerse en cuenta al efectuar el proyecto, los siguientes aspectos.

Tal como se mencionó merecen especial atención las excavaciones que se lleven a cabo en suelos plásticos de baja consistencia. Si en tales suelos la profundidad de la excavación es superior a 12-15 m y las dimensiones longitudinales son tales que no puede contarse con un efecto bóveda, es preciso estudiar con detalle la posible deformación del muro. Eventualmente, debe preverse un apuntalamiento intermedio.

Entre los medios auxiliares más eficaces de sostenimiento del soporte lateral, se encuentran los anclajes. Aparte de permitir la aplicación de esfuerzos iguales o superiores a los empujes del terreno mediante su postensado, limitando los movimientos, permiten racionalizar los trabajos de la construcción enterrada.

Los anclajes ejercen una considerable influencia sobre la magnitud del desplazamiento de los muros. Indudablemente, aún con un elevado pretensado de los anclajes, no pueden evitarse completamente los corrimientos, pero se puede conseguir una disminución. Puede además lograrse una reducción suplementaria adop-



ZONA I

Arcilla blanda a dura.
Mano de obra promedio.

ZONA II

a) Arcilla muy blanda a blanda.

1) Profundidad limitada de arcilla, debajo del fondo de la excavación.

2) Profundidad consierable de arcilla, debajo del fondo de la excavación.

b) Asentamientos son afectados por dificultades en la construcción.

ZONA III

Arcilla muy blanda a blanda a profundidad considerable, debajo del fondo de la excavación.

Asentamientos adyacentes a excavaciones a cielo obierto en arcillas.

Figura 8

tando longitudes de anclaje superiores a las que exigen las comprobaciones de estabilidad. Llevando los anclajes por debajo de la solera se contribuye también a disminuir el corrimiento de los muros.

El sistema de protección de excavaciones por medio de anclajes ha desplazado en la actualidad practicamente a las excavaciones apuntaladas. los numerosos ejemplos en grandes ciudades a nivel mundial, de excavaciones excepcionales para líneas de metros, demuestran que pueden asegurarse por medio de anclajes excavaciones de cualquier dimensión sin que se presenten daños en las edificaciones contiguas.

Son esenciales buenos procedimientos de construcción. Experiencias de varias decenas de obras, indican que los muros rígidos de concreto excavados "in situ" mediante el empleo de lodos de perforación, acompañados de anclajes cuando se requieran, son efectivos en cuanto a limitar los movimientos e impedir la entrada de agua al recinto excavado, cuando ésta existe en el terreno.

CONCLUSIONES

El concepto simple de fundación compensada enfocado como el balance de cargas del edificio con peso de suelo excavado, debe expresarse en forma más precisa, en su aspecto geotécnico, en función de esfuerzos efectivos admisibles sobre el suelo, considerando los problemas de falla por cortante y desplazamientos del terreno.

El comportamiento del suelo respecto a su caracterización, respuesta y análisis geotécnico, constituye un factor primordial para precisar conceptos y magnitudes determinantes del diseño de una fundación compensada. El criterio aplicable al seleccionar los parámetros mecánicos del suelo para el diseño de la cimentación, y los análisis subsiguientes, es función de si el depósito, en el intervalo de profundidades controlante del comportamiento, se va a comportar como normalmente consolidado o como pre-consolidado.

La hechura de la excavación para la fundación a la profundidad requerida reduce la esfuerzo vertical en el suelo bajo la fundación. Esto ocasionará levantamiento del fondo de la excavación. Cualquier levantamiento que ocurra se invertirá y convertirá en asentamiento durante la construcción del edificio.

Para obtener un comportamiento satisfactorio de una fundación compensada es importante reducir grandes expansiones del fondo, asentamientos subsiguientes y movimientos laterales de la excavación. El flujo plástico hacia el fondo de la excavación, también produce expansión, adicional a la respuesta elástica del suelo.

Uno de los problemas de asentamientos de manejo más delicado, se presenta cuando se deben cimentar zonas del edificio muy diferentemente cargadas, como en el caso de torres elevadas rodeadas de alas o bloques con número de pisos sustancialmente menores.

Efectos imprevistos de superposición de presiones por estructuras contiguas, amarre o continuidad estructural inapropiados y juntas deficientes, pueden modificar la distribución de presiones asumida en base a coincidencia de centroides, generando excentricidades de la resultante de cargas. En el caso de cargas de gran magnitud como en edificios altos o equipos industriales pesados, aún excentricidades en apariencia moderadas, pueden conducir a grandes momentos sobre la fundación generando presiones desiguales que producen asentamientos diferenciales.

En ciertos casos estos asentamientos diferenciales conducen a ladeamientos de la estructura que tienden a amplificar la excentricidad de las cargas, efecto que puede adquirir caracteres críticos y crear problemas de costosa corrección, cuando el centro de gravedad de las cargas verticales es elevado respecto al nivel de fundación.

La estabilidad de un edificio depende de las cargas horizontales de viento y sismos, no tratados en estas notas. No debe perderse de vista, sin embargo, que construcciones muy esbeltas apoyadas en el suelo, pueden llegar a ser inestables por esfuerzos transmitidos inferiores a los esfuerzos límites calculados con las fórmulas usuales de la Mecánica de Suelos. Constituye un proceso de inestabilidad similar al pandeo, originado en excentricidades de la resultante de las cargas respecto al centroide del área de soporte de la fundación. El par de respuesta del suelo depende de fenómenos elasto-plásticos cuya cuantificación requiere una determinación cuidadosa de los parámetros pertinentes del suelo de soporte.

La influencia de las excavaciones sobre las edificaciones próximas es un problema importante, más común y serio de lo que generalmente es reconocido en la práctica, en el momento de anticipar las medidas de protección y prever los desembolsos para su estudio y ejecución.

Los desplazamientos dependen de factores tales como la rigidez del muro de soporte lateral, las dimensiones y profundidad de la excavación, las características del terreno subyacente y el tipo de apuntalamiento o anclaje. Los problemas más serios se producen generalmente cuando se presentan suelos dbiles y compresibles. La excavación en arcillas blandas y medias causa los movimientos más importantes y perjudiciales.

ANEXO 1

MOVIMIENTOS CARACTERISTICOS DE LAS EXCAVACIONES

(Adaptado de: "Influencia de las excavaciones sobre edificaciones próximas". Manuel Maestre Orts. ETA. 1975.)

Una excavación remueve una masa de suelo y agua y produce una reducción de esfuerzos totales en los lados y el fondo del corte. La reducción de estos esfuerzos durante la excavación, genera un movimiento del suelo hacia el interior de la misma y hacia arriba en el fondo. A medida que estos movimientos ocurren, el suelo adyacente a la excavación sufre desplazamientos laterales y asentamientos.

El asentamiento del terreno adyacente está relacionado con el movimiento hacia dentro, tanto por encima como por debajo del nivel de excavación, a lo largo de las paredes del corte.

En la magnitud y distribución de los movimientos que acompañan a la excavación, incide un gran número de factores interdependientes. Entre los más determinantes, se tienen:

- Dimensiones, especialmente la profundidad de la excavación.
- Condiciones del suelo.
- Rigidez del sistema de soporte lateral y secuencias en la instalación del mismo.
- Tiempo que permanece abierta la excavación.
- Detalles de construcción y pericia en la mano de obra.
- Control de las aguas subterráneas.

Debido a la naturaleza compleja de los cambios de tensiones causados por la excavación y a la influencia de variables, tales como la experiencia del constructor y la de su mano de obra, no se pueden hacer predicciones cuantitativas fáciles de los movimientos del suelo, basándose únicamente en ensayos de muestras y análisis teóricos.

No obstante, bajo ciertas condiciones, los métodos de cálculo por elementos finitos, permiten determinar con excelente aproximación las deformaciones del conjunto, teniendo en cuenta las diferentes fases de excavación y colocación de apoyos o anclajes. Debe considerarse, sin embargo, que la utilización de tales métodos necesita un programa refinado de ensayos de reconocimiento y de laboratorio, y de un tratamiento por computador importante. Un sistema de mediciones de campo bien controlado permite calibrar estos modelos, mejorando su capacidad de predicción y facilitanto se extrapolación a otras áreas con condiciones similares.

Constituyen procedimientos afinados y precisos, adaptables a proyectos de importancia, para los cuales los cálculos de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos necesitan un análisis profundo. No obstante que aún en la actualidad los elementos finitos no son un mètodo de cálculo de uso diario para el análisis en ingeniería, la evolución acelerada en la capacidad de los medios de computación y en la disminución de los costos, pueden convertirlos en herramientas de análisis con mayor disponibilidad y economía, facilitando así su uso más intensivo y frecuente.

Mediciones de campo evaluadas son, por tanto, el factor clave para hacer predicciones y guiar los criterios en los casos prácticos que se presentan con mayor frecuencia. La referencia presenta gráficos que resumen los movimientos máximos (deformaciones laterales y asentamientos) medidos durante excavaciones en varios tipos de suelo. Esta figura contiene datos de un número de casos estudiados por Peck y D'Appolonia, según observaciones obtenidas en excavaciones entibadas con pilotes y prefabricados o con tablestacas metálicas, sostenidas con puntales inclinados o tirantes anclados. Los siguientes apartes ofrecen conclusiones del análisis de estos gráficos.

En arenas sueltas y suelos granulares cohesivos, los movimientos hacia el interior de la excavación son pequeños -del orden de 2.5 cm para excavaciones de cerca de 20 m- a condición de que los puntales o anclajes se pretensen correctamente.

En arcillas blandas y medias se ha hecho un número considerable de mediciones, que evidencian que los movimientos máximos hacia el interior de paredes flexibles y los asentamientos máximos de la superficie son, generalmente, del orden del 1 al 2 % de la profundidad excavada. Por ejemplo, en una excavación de 10 m de profundidad estos movimientos estarían entre 10 y 20 cm.

A medida que la rigidez de la arcilla aumenta, los movimientos causados por la excavación disminuyen, los movimientos máximos son sólo una pequeña fracción de la profundidad de la excavación (del orden de 0,1 a 0,2%).

Las mediciones hechas en tramos experimentales del "Metro" de Boston, han demostrado que los movimientos asociados con excavaciones en limos orgánicos compresibles pueden ser de igual importancia que los originados en arcillas blandas.

La magnitud de los asentamientos y su distribución respecto a la distancia al borde de la excavación, han sido observados por Peck (Figura 8) señalando que, en arcillas blandas, los asentamientos importantes pueden encontrarse a distancias equivalentes de hasta 2-4 veces la profundidad de la excavación.

La relación entre asentamiento, movimiento lateral del soporte y levantamiento del fondo de una excavación, ha sido demostrada por extensas mediciones hechas en excavaciones en Oslo y descritas por el Instituto Geotècnico Noruego. La figura 9 muestra que el

volumen de asentamiento del terreno adyacente fue aproximadamente igual al volumen de movimiento lateral del tablestacado y que ambos movimientos están relacionados con el levantamiento medido debajo del nivel de excavación.

El movimiento lateral importante que ocurre por debajo del nivel de excavación, está controlado por la resistencia combinada de la porción de soporte enterrado y las características del suelo debajo del fondo excavado. Pilotes instalados entre 2 y 3 m de separación, oponen muy poca resistencia al movimiento general bajo el nivel de excavación y la experiencia ha demostrado que aún la sección más robusta de tablestacas metálicas no es lo suficientemente rígida para restringir el movimiento lateral de forma significativa.

Mediciones realizadas igualmente en el "Metro" de Boston y San Francisco, sugieren que los muros de concreto reforzado construidos "in situ" tienen una influencia importante en cuanto a la limitación de los movimientos bajo el nivel de excavación. Inclinómetros colocados en el muro de hormigón mostraron movimientos máximos de 1.3 cm, en comparación con los movimientos máximos de 11.4 a 17.8 cm en las secciones en que se usaron tablestacas metálicas. El perfil del terreno, las profundidades de remoción de tierras y la separación de puntales, eran casi idénticos en ambos casos, la única diferencia significativa consistía en la rigidez del soporte.

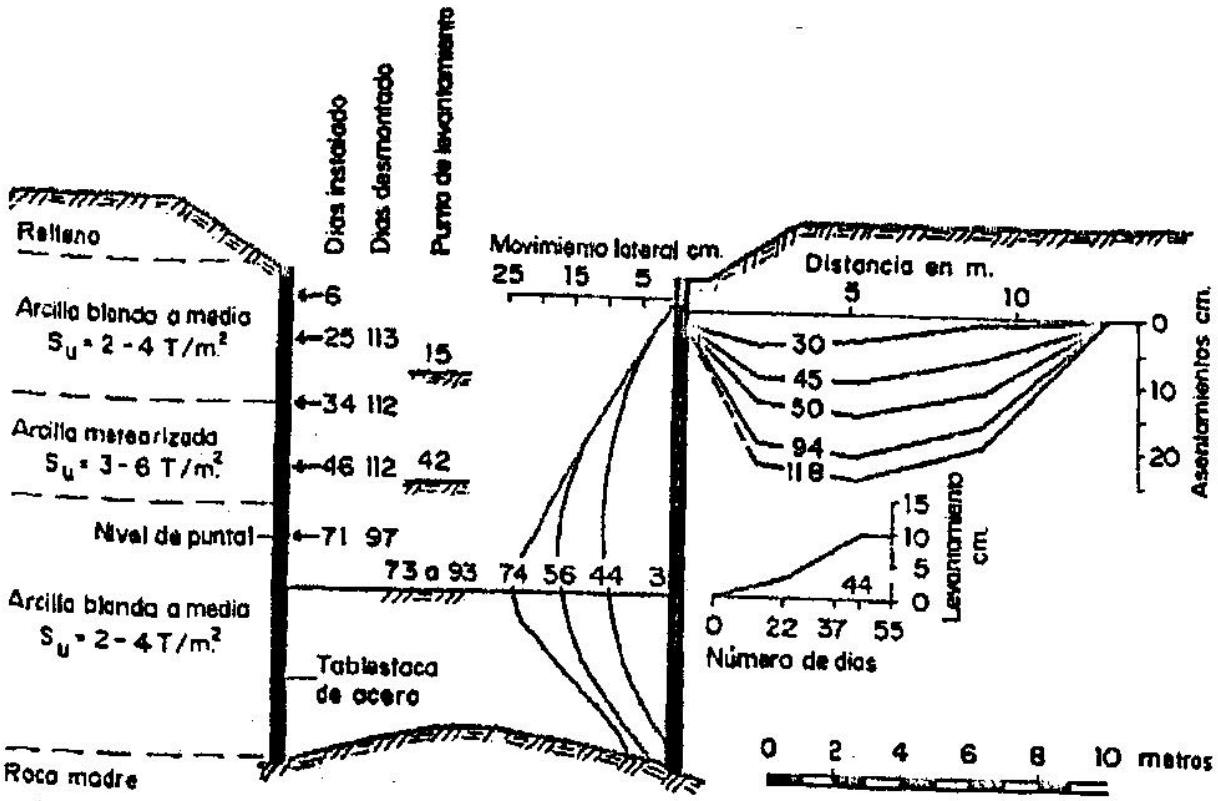
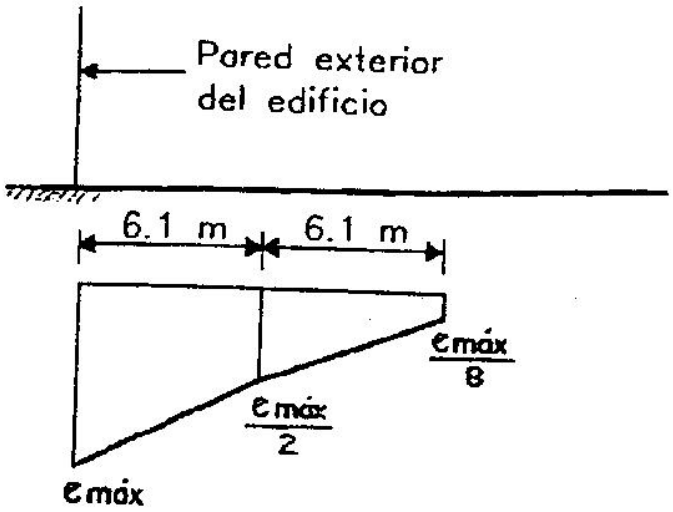

Días instalado
Días desmontado
Punto de levantamiento
Relleno
Arcilla blanda a media
S_u = 2 - 4 T/m²
Arcilla meteorizada
S_u = 3 - 6 T/m²
Nivel de puntal
Arcilla blanda a media
S_u = 2 - 4 T/m²
Tablestaca de acero
Roca madre
←6
←25 113
15
←34 112
←46 112 42
←71 97
73 a 93 74 56 44 3
Movimiento lateral cm.
25 15 5
Distancia en m.
5 10
30
45
50
94
118
0
10
20
Asentamientos cm.
15
10
5
0
44
Levantamiento cm.
0 22 37 55
Número de días
0 2 4 6 8 10 metros

Figura 9



Estructura	e máx.
Ladrillo	2 pulgadas
Bloque de concreto	3/4 "
Mamposteria piedra	1 "
Marco acero o concreto	2 "

Asentamiento máximo tolerable para prevenir daños arquitectónicos por construcciones vecinas

Figura 10

ANEXO 2

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE INGENIERIA DE FUNDACIONES

REQUISITOS BASICOS DE LAS FUNDACIONES.

Es usual definir criterios de comportamiento esperado como base de diseño para las estructuras. El estado actual de conocimientos en fundaciones y análisis geotècnico señala que las fundaciones deben cumplir con un mínimo de requisitos básicos, si se espera un comportamiento satisfactorio bajo la acción de las cargas a través de su vida útil. Tales requisitos dependen en general de las condiciones de la estructura y del suelo de soporte, actuando conjuntamente. Brevemente, estas requisitos básicos serían:

1) La fundación debe estar apropiadamente localizada o protegida respecto a cualquier potencial influencia que pueda afectar nocivamente su comportamiento.

2) La fundación y el suelo de soporte deben ser estables y seguros respecto a fallas asociadas a la acción de las cargas.

3) La fundación no debe asentarse o deflectarse en una magnitud tal que deteriore la estructura o limite su utilidad.

4) La fundación y los procesos constructivos asociados no deben afectar estructuras vecinas o desestabilizar el medio en el cual queden emplazadas.

El primer requisito involucra con frecuencia condiciones no cuantificables, dada la posible variedad y acción aleatoria de agentes ambientales y externos. Es decir, casi nunca es viable disponer de herramientas analíticas precisas, siendo necesario utilizar criterio, experiencia y la consideración de antecedentes similares en el área.

El segundo requisito es más específico y es algo similar al de seguridad a la falla de un elemento estructural. El tercer requisito, aunque específico en su planteamiento, encierra aspectos de incertidumbre relativos a la predicción de los asentamientos en condiciones erráticas y complejas del suelo de soporte, así como a la determinación del asentamiento crítico para la estructura. No obstante, el segundo y tercer requisitos, permiten bajo condiciones favorables, hacer predicciones en base a los mètodos de análisis de la Geotecnia.

El grado en el cual el cuarto requisito afecta la selección del tipo y sistema constructivo de la fundación, está vinculado a las decisiones tomadas en base a los tres primeros, así como a las caracteristicas de las obras y medio geotècnico, comprometidos.

ASES DE LA SELECCION Y DISEÑO DE FUNDACIONES.

La selección y diseño de fundaciones es un proceso que debe que integrado y ser coherente con el programa general del proyecto. Si embargo, para que sea racional y ordenado, es conveniente que se enfoque con criterios metodológicos de probada conveniencia en estudios y diseños de obras en la ingenieria. Un método racional consiste en avanzar de lo general a los especifico a través de fases de actividad, ordenadas según un nivel creciente de detalle e identificadas como:

- Informativas
- Indagatorias
- Analiticas
- Decisorias

De acuerdo con esta orientación, es posible separar las fases de de actividad, en el desarrollo de los estudios, de la siguiente manera:

A- DETERMINACION DE ANTECEDENTES Y CONDICIONES BASICAS.

- Necesidades y orientaciones básicas del proyecto.
- Investigación de suelos

B- DETERMINACION DE FACTORES Y CRITERIOS

- Determinación de factores determinantes de la selección y diseño.
- Fijación de criterios de selección y análisis.

C- ANALISIS Y DISEÑO

Proceso interactivo con retroalimentación de resultados, en las siguientes actividades:

- Selección de alternativas viables
- Adopción de modelos de análisis
- Fase decisoria de análisis y dimensionamiento
- Diseño final y especificación

Se incluye un diagrama de fases con todas las secuencias, contenidos e interrelación del proceso.

INVESTIGACION DE SUELOS.

Las decisiones y diseños relacionados con las fundaciones y sus consecuencias, deben basarse en un conocimiento racionalmente proporcionado a la indole, importancia y fase de desarrollo del

proyecto. Las investigaciones, estudios y análisis correspondientes es usual que conformen el llamado Estudio de Suelos, orientado típicamente hacia los siguientes objetivos:

- Apreciar la viabilidad del sitio para fundar la estructura en proyecto. Debe permitir definir los factores geotécnicos determinantes de la fundación.

- Determinar el sistema de mantos del suelo para cimentar la obra, en condiciones estables, es decir, cumpliendo con los requisitos básicos de las fundaciones.

- Seleccionar el tipo de cimentación y modo de construirla.

- Precisar los parámetros, criterios e información necesaria para el diseño y especificación de la obra.

- En caso necesario, establecer las medidas y disposiciones necesarias para la protección de las estructuras propias y vecinas, así como del entorno geotécnico de emplazamiento de la fundación.

- Anticipar las necesidades respecto al control de las obras de fundación durante la construcción, y fijar pautas para su aplicación.

FACTORES DETERMINANTES DEL TIPO Y DISEÑO DE LAS FUNDACIONES.

El estudio de las fundaciones debe permitir identificar y formular con precisión los factores significativos que en cada caso particular se requieran para la selección y diseño de la fundación. Esto es posible mediante el uso combinado de las disciplinas y técnicas de la ingeniería de suelos y fundaciones, conjuntamente con todos los aspectos funcionales, constructivos y económicos; regidos por experiencia y criterio proporcionados a la trascendencia de la obra. Para adquirir una idea de su índole y alcance, es posible considerar una agrupación resumida de estos factores desde el punto de vista de los aspectos involucrados.

1. Ambiente y estabilidad geológicos.

2. Cargas y características de las estructuras.

3. Respuesta del sistema fundación-suelo.

4. Características del piso de fundación.

5. Respuesta del suelo involucrado.

6. Condiciones hidráulicas del subsuelo.

7. Localización ambiental del sitio.

8. Grado de precisión requerido en el análisis y diseño.

9. Factores económicos.

10. Procedimiento y efectos constructivos.

La apreciación y criterio del ingeniero influyen innegablemente en la evaluación y balance de los factores anteriores, conducentes a establecer su incidencia en la selección y diseño de la fundaciones. De hecho, el ingrediente subjetivo involucrado puede conducir a diferentes soluciones para el mismo problema. Una solución conveniente, que armonice los diferentes aspectos relevantes de la obra, puede obtenerse mediante el consenso resultante del trabajo en equipo de representantes de los proyectistas, contratistas, especialistas en estructuras y suelos.

FACTOR GEOTECNICO DE SEGURIDAD

Para obtener los esfuerzos admisibles en el suelo, en el diseño de cimentaciones, se dividen los esfuerzos últimos o límites por un factor de seguridad. De esta manera se busca que los esfuerzos de trabajo queden suficientemente alejados de una región peligrosa en los esfuerzos, donde posiblemente ocurrirían colapsos o desplazamientos grandes y nocivos de la fundación. Como, por otro lado, la evaluación de un valor crítico de los esfuerzos ofrece por lo general incertidumbres insalvables, propias de las limitaciones de la aplicación de las teorías geotécnicas a las complejas condiciones reales, el factor de seguridad se acostumbra adoptar como una salvaguardia contra:

a) Variaciones naturales de la resistencia al corte, compresibilidad y otras características del suelo de soporte.

b) Incertidumbres en la precisión o confiabilidad de los métodos teóricos o empíricos para evaluar las capacidades de carga. Las hipótesis o suposiciones simplificativas de la teoría geotécnica se acomodan dificilmente a las complejas condiciones reales.

c) Deterioros locales en la capacidad portante del suelo de soporte, producidos por la construcción o por eventos posteriores.

d) Asentamiento excesivo ocasionado por la cedencia del suelo cuando la fundación se encuentra próxima a sufrir una falla por corte.

La variabilidad en las condiciones del suelo, constituye la razón principal para adoptar un adecuado factor de seguridad. Sin embargo, en general, la magnitud asignable en cada caso al factor de seguridad depende principalmente de la confiabilidad de la información de diseño y de la exactitud con que puedan determinarse las acciones de la estructura y las cargas actuantes. Inciden igualmente en el factor de seguridad, la precisión de los análisis, la calidad de la construcción y la posibilidad y trascendencia de una falla durante la vida util de la estructura.

El diseño de los fundaciones involucra más y mayores incertidumbres y aproximaciones que el de otras estructuras en razón de la complejidad del comportamiento del suelo, la interacción suelo-estructura y las deficiencias en el conocimiento del suelo de soporte. El factor de seguridad asignable en cada caso particular, debe considerar la evaluación de las incertidumbres y aproximaciones mencionadas para llegar a una magnitud razonable y suficiente, pero sin perder de vista algunos o la totalidad de los siguientes aspectos:

a. Magnitud de los posibles daños y pérdidas de vida, propiedad, así como perjuicios económicos y legales.

b. Costos relativos de un incremento en el factor de seguridad.

c. Incidencia del cambio del factor de seguridad en la variación de la probabilidad de falla.

d. Confiabilidad de la información del suelo.

e. Tolerancias constructivas.

f. Cambios en las propiedades del suelo producidos por operaciones constructivas.

g. Hipótesis y limitaciones involucradas en el desarrollo de los métodos de análisis y diseño.

ANALISIS GEOMECANICO FUNDACIONES COMPENSADAS

BIBLIOGRAFIA

1 - Varios expertos españoles. Cimentaciones urbanas calidad y moderna tecnologia. ETA. 1975.

2 - Winterkorn, Fang. Foundation Engineering Handbook. Van Nostrand R. 1975.

3 - Attewell, Taylor. Ground Movements and their Effects on Structures. Surrey University Press. 1984.

4 - D'Appolonia. Effects of Foundation Construction on Nearby Structures. IV Panam. Conf. S. Mech. and F. E. 1971.

5 - Golder. The Allowable Settlement of Structures. IV Panam. Conf. S. Mech. and F. E. 1971.

6 - Terzaghi, Peck. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley. 1967.

7 - J. T. Christian. Soil-Structure Interaction for Tall Buildings. Int. Conf. on Plann. and Des. of. Tall Build. 1972.

8 - Zeevaert. Design of Compensated Foundations. Int. Conf. on Plann. and Des. of. Tall Build. 1972.

9 - Bowles. Foundation Analysis and Design. McGraw Hill. 1988.

10 - Das. Principles of Foundation Engineering. Brooks/Cole Eng. Div. 1984.

11 - Das. Advanced Soil Mechanics. McGraw Hill. 1983.

12 - Simons, Menzies. A Short Course in Foundation Engineering. Buttersworths. 1977.

13 - Finno, Atmatzidis, Perkins. Observed Performance of a Deep Excavation in Clay. Journal of Geot. Eng. ASCE. Aug. 1989.

14 - Finno, Nerby. Saturated Clay Response During Braced Cut Construction. Journal of Geot. Eng. ASCE. Aug. 1989.

15 - Boscardin, Cording. Building Response To Excavation-Induced Setlement. Journal of Geot. Eng. ASCE. Jan. 1989.

16 - Whitlow. Basic Soil Mechanics. Construction Press. 1983.

17 - Zeevaert. Foundation Engineering for Difficult Soil Conditions. Van Nostrand R. 1972.

18 - Zeevaert. Interacción suelo-estructura de cimentación. Limusa. 1980.