

RESUMEN

El problema de interacción estática suelo-estructura de cimientos superficiales ha sido ampliamente estudiado en los últimos años. En este artículo se presenta primero una revisión de la literatura reciente sobre el tema. Se destacan en ella las derivaciones de matrices de rigidez "exactas" de vigas basadas en los modelos simplificados, con las cuales es posible realizar análisis de interacción sin que los resultados dependan del grado de refinamiento de la malla. Se explican también en la literatura cuatro procedimientos de interacción basados en los modelos del medio elástico semi-infinito, tres de los cuales, tal como se indica y compara en este documento, ya han sido reportados y usados con algunas variaciones en nuestro medio. Se plantean por último algunas conclusiones que se desprenden de los diferentes procedimientos para realizar el análisis así como también de sus aplicaciones.

G. Gómez

MODELOS, PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS RECIENTES SOBRE LA INTERACCION ESTATICA SUELO ESTRUCTURA DE CIMENTOS SUPERFICIALES

INTRODUCCION

El problema de interacción estática suelo-estructura de cimientos superficiales ha sido ampliamente estudiado en los últimos años. Sus aplicaciones en la ingeniería civil requieren del desarrollo de métodos prácticos de análisis que estén al alcance de nuestros ingenieros.

Varios procedimientos para el análisis del fenómeno de interacción estática ya han sido presentados y usados en nuestro medio (Perez 1985, Salvá 1985, Villafañe et al 1989). Publicaciones recientes sobre el tema proponen o revisan métodos con objeto de facilitar los análisis de interacción. El objeto de este documento es el de revisar estos artículos recientes y comparar sus propuestas con aquellas que ya se han estudiado en nuestro medio. Se espera mejorar las posibilidades de nuestros ingenieros para realizar análisis de interacción estática en aquellos casos en que se requiere.

En este documento se hace primero un resumen sobre los modelos y métodos usados para efectuar el análisis de interacción estática suelo-estructura de cimientos superficiales. Se explican luego las tendencias y desarrollos que sobre el tema en consideración se han presentado en artículos recientes. Posteriormente se discuten las ventajas y posibilidades de estos desarrollos y se presenta también un método práctico de análisis que podría tener un gran potencial en el futuro. Por último se plantean algunas recomendaciones y conclusiones sobre los métodos de análisis.

ANTECEDENTES

Muchos modelos y métodos han sido planteados para realizar análisis de interacción estática suelo-estructura. Una posible clasificación de ellos es : 1. Modelos simplificados; 2. Modelos del medio elástico semi-infinito; y 3. Modelos basados ya sea en el método de los elementos finitos o en el método de los elementos de contorno. Una discusión exhaustiva sobre esta clasificación puede encontrarse en un documento anterior de los autores (Villafañe et al, 1989). A continuación se hace una descripción sucinta sobre cada tipo.

Con base en simplificaciones sobre el comportamiento del suelo, los modelos simplificados trabajan con una ecuación diferencial que relaciona los asentamientos con las presiones en la superficie de contacto suelo-estructura. Se reduce así la dimensionalidad del problema a uno y dos, en los casos bi y tridimensional, respectivamente. Las constantes o parámetros que resultan en las ecuaciones diferenciales deben luego relacionarse con las

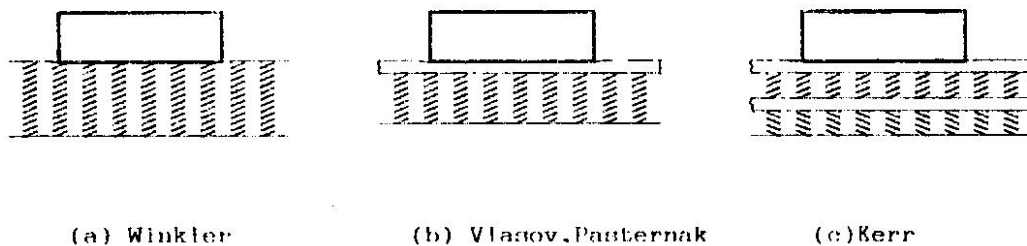


Fig.1. Modelos simplificados

propiedades del suelo, para lo cual existen muchas propuestas. A esta categoría pertenecen el modelo de Winkler cuya ecuación descriptiva contiene un parámetro del suelo (módulo de subrasante), los modelos de Pasternak y Vlasov que requieren de dos parámetros y el modelo de Kerr que usa tres parámetros. En la Fig. 1 se ilustran los modelos de estas tres cimentaciones.

En los modelos del segundo tipo se discretiza primero el área de contacto suelo-estructura. Se calcula luego el asentamiento en cada banda debido a distribuciones de presión unitarias en el resto de ellas. Se obtiene así una ecuación que contiene la matriz de flexibilidad del suelo, la cual es totalmente poblada. Usando luego diferentes procedimientos, ésta ecuación matricial se resuelve conjuntamente con la ecuación que caracteriza el comportamiento de la estructura. Los modelos de esta categoría se describen matemáticamente mediante las ecuaciones que aparecen a continuación.

Ecuación matricial del suelo

$$[f] p = \underline{\delta} \quad (1)$$

donde $[f]$ es la matriz de flexibilidad del suelo, p es el vector de presiones en las áreas de discretización, y $\underline{\delta}$ es el vector que contiene los desplazamientos en la superficie de contacto.

Ecuación matricial de sistema superestructura fundación

$$[K] \underline{\delta} = \underline{F} - \underline{F}_b \quad (2)$$

donde $[K]$ es la matriz de rigidez de la cimentación (si se considera la superestructura en el análisis $[K]$ contiene su

rigidez condensada en la base), $\underline{F}$ es el vector de cargas sobre la cimentación y $\underline{F}_b$ es el vector de fuerzas de reacción del suelo. Además

$$[A] \underline{p} = \underline{F}_b \quad (3)$$

donde $[A]$ contiene las áreas aferentes de cada franja.

Finalmente, en el tercer tipo de modelos de interacción se incluyen aquellos mediante los cuales se discretiza el suelo usando ya sea el método de los elementos finitos o el de los elementos de contorno. La utilización de esta alternativa no se considera aquí por su alto costo computacional para análisis rutinarios.

REVISION DE ARTICULOS RECIENTES

A continuación se analizan algunos artículos recientes sobre el tema en consideración.

Chiwanga y Valsangkar (1988) usan el modelo de Pasternak o Vlasov (modelo de dos parámetros) para derivar la matriz de rigidez así como los vectores nodales de fuerzas de una viga. Usando las soluciones exactas de la ecuación diferencial que gobierna el modelo calculan la componente k_{ij} como la fuerza en el grado de libertad i debida a un desplazamiento unitario en el grado de libertad j , cuando los otros desplazamientos son nulos. La matriz y los vectores son "exactos" en el sentido de que los resultados de problema no dependen del grado de refinamiento durante la discretización. Este mismo procedimiento fue usado para derivar la rigidez "exacta" de una viga en fundación de Winkler (Ting y Mockry, 1984), comentado en nuestro medio por Huertas(1985). Sirosh y Ghali (1989) tienen en cuenta también las soluciones exactas de la ecuación diferencial, usan en su análisis la matriz de rigidez "exacta" de una viga sometida a carga axial en fundación

de Winkler.

Por su parte, Chillon y Wekezer (1990) presentan la derivación de una matriz de rigidez para un elemento placa rectangular en fundación de Winkler. Este procedimiento se hace usando las funciones de forma del elemento y la matriz no es por tanto "exacta" en el sentido usado antes. Es si una matriz consistente, ya que contiene en su derivación las funciones de forma del elemento y su uso representa una mejoría (en cuanto a convergencia, para el modelo usado) respecto a la matriz diagonal o de resortes concentrados en los nodos, situación análoga a la que ocurre con las matrices de masa consistentes usadas en análisis dinámicos. El proceso consiste en incluir en la energía potencial de la placa el término debido a la reacción del suelo, o sea

$$1/2 \int_A (w)k(w)dA \quad (4)$$

donde w es la función que representa la deflexión vertical y k es el módulo de reacción de la subrasante. Luego se aproxima w utilizando las funciones de forma o de interpolación contenidas en la matriz $[N]$

$$w(x,y) = [N] \underline{w} \quad (5)$$

donde $\underline{w}$ contiene los desplazamientos nodales del elemento. Por último se minimiza la energía potencial del sistema y se obtiene la contribución del suelo a la rigidez

$$[K_s] = k \int_A [N]^T [N] dA \quad (6)$$

El anterior es el procedimiento tradicional que se usa en el método de los elementos finitos para derivar rigideces de elementos

(Zienckiewicz y Taylor 1989).

Los resultados de las propuestas discutidas anteriormente tienden a facilitar la solución numérica de los problemas según las hipótesis de cada modelo. Ellas no presentan nuevas alternativas para relacionar los parámetros de cada modelo con las propiedades y geometría del sistema suelo-estructura, lo cual es probablemente la mayor dificultad de los modelos simplificados. Por el contrario, Vallabhan y Das (1991) recomiendan un método que permite calcular de una manera sistemática los dos parámetros del modelo de Vlasov. El procedimiento iterativo consiste en suponer inicialmente el valor de uno de los parámetros y luego, mediante la solución de las ecuaciones, refinar dicho valor hasta alcanzar el grado de aproximación deseado. Las fórmulas que usa el método se derivan al minimizar la energía potencial del sistema.

Cuando se efectúa un análisis de interacción usando los modelos del medio elástico semi-infinito resulta un sistema matricial de ecuaciones en el cual, como se dijo antes, la matriz de flexibilidad del suelo es totalmente poblada, propiedad ésta que corresponde con el hecho físico de que las deflexiones en la superficie del suelo debidas a cargas unitarias son cero sólo en puntos muy alejados de éstas (teóricamente en el infinito). Esta situación dificulta el tratamiento numérico del problema en microcomputadores. Hemsley (1990) hace una descripción de cuatro métodos que facilitan la realización del análisis. Por considerarlo de especial importancia se hace a continuación un recuento de ellos.

El primero es el método del radio de influencia. Como su nombre lo indica, consiste en prescribir artificialmente un radio de influencia para cada nodo, mas allá del cual se desprecian las deflexiones debidas a la carga unitaria en aquel. Numéricamente esta suposición conduce a que la matriz de flexibilidad del suelo sea de banda, facilitándose por tanto su manejo y solución en microcomputadores. Hemsley indica que la confiabilidad del método

depende del problema, ya que los resultados son altamente sensibles a variaciones de la rigidez relativa de la cimentación y del tipo de carga aplicada.

El segundo método consiste en efectuar un análisis iterativo mediante el cual se calculan sucesivamente vectores de desplazamiento que convergen a la solución del problema. Para efectuar el procedimiento la ecuación del conjunto se reorganiza para que la matriz de coeficientes sea de banda. Métodos iterativos similares a éste han sido usados por otros investigadores (Zeavenert, 1980).

La tercera propuesta de Hemsley consiste en solucionar directamente las ecuaciones (1), (2) y (3) de la siguiente manera. Primero se determina, mediante la inversión de la ecuación (1), la matriz de rigidez del suelo

$$[K_s] \underline{\delta} = \underline{F}_s \quad (7)$$

la cual se reemplaza luego en la ecuación (2) para obtener

$$[T] \underline{\delta} = \underline{F} \quad (8)$$

donde

$$[T] = [K] + [K_s] \quad (9)$$

sistema este que particiona Hemsley así

$$\left[\begin{array}{c|c} T_{11} & T_{12} \\ \hline T_{21} & T_{22} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \theta_i \\ \hline w_i \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} M_i \\ \hline Q_i \end{array} \right\} \quad (10)$$

donde T_{11} es una matriz de banda asociada con las rotaciones θ_i , y T_{22} es una matriz completamente poblada asociada con los desplazamientos verticales w_i . Posteriormente se calcula $\underline{w}$

$$\underline{w} = ([T_{22}] - [T_{21}][T_{11}]^{-1}[T_{12}])^{-1} (Q - [T_{21}][T_{11}]^{-1}M) \quad (11)^{(1)}$$

y luego por substitución inversa se calcula $\underline{\theta}$

$$\underline{\theta} = [T_{11}]^{-1} (\underline{M} - [T_{12}] \underline{w}) \quad (12)^{(1)}$$

Hemsley argumenta que este algoritmo es muy eficiente ya que se deben invertir matrices de un orden menor que las originales. Cabe anotar aquí que el procedimiento directo propuesto por Gómez (1989) no requiere de inversión de matrices. Consiste en reemplazar las ecuaciones (1) y (3) en (2) para obtener

$$([K][I] + [A]) \underline{p} = \underline{F} \quad (13)$$

de la cual se calcula el vector $\underline{p}$ usando el proceso de Gauss, y luego mediante la ecuación (1) se determinan los asentamientos. Mejoras del procedimiento se logran si se particiona el sistema en sus componentes angulares y de asentamientos.

La cuarta y última propuesta de Hemsley consiste en realizar un análisis iterativo considerando separadamente el suelo y el sistema cimentación-superestructura (si es que se tiene en cuenta ésta última). Primero se calculan los asentamientos en el suelo suponiendo que las cargas sobre la cimentación actúan directamente sobre él. Usando luego las relaciones carga/asentamiento obtenidas en el análisis anterior como las constantes de rigidez de resorte, se calculan entonces los asentamientos, considerando ya no el suelo aislado sino el sistema cimentación-superestructura apoyado en un colchón de resortes de rigidez variable; con la distribución de

(1). En el artículo original aparece intercambiado el orden de una multiplicación. En este documento se escribe el orden correcto.

presiones obtenida se calculan de nuevo los asentamientos en el suelo aislado y se continúa el proceso hasta que la diferencia de asentamientos en dos fases sucesivas sea mínima. Este procedimiento, que ya fue presentado en nuestro medio (Villafañe et al, 1989), permite aprovechar las ventajas numéricas del modelo de Winkler así como también posibilita el cálculo racional de módulo de rigidez de los resortes y su variación a lo largo y ancho de la cimentación. También es posible usar este método con los programas comerciales tal como se propone más adelante.

DISCUSION

La cimentación de Vlasov, de 2 parámetros, parece que caracteriza mejor que la de Winkler el comportamiento del suelo, ya que induce cierta continuidad en los resortes que lo representan. Sin embargo, se puede demostrar cualitativamente que una cimentación de Vlasov se puede reducir a una de Winkler. En efecto, suponiendo que sobre la capa de cortante ilustrada en la Fig. 2.(a) se efectúan dos cortes a cada lado de la viga (Fig. 2.(b)). El efecto que las zonas

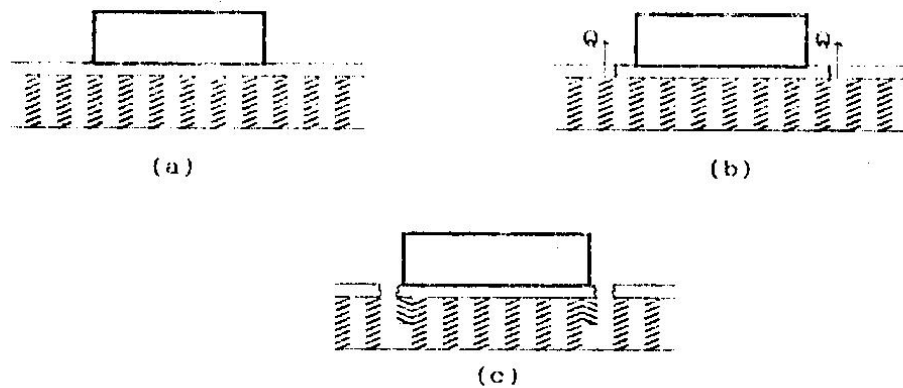


Fig.2. Reducción de la cimentación de Vlasov a una de Winkler

laterales de la capa ejercen sobre el centro se caracteriza por fuerzas cortantes Q , las cuales son proporcionales a la deflexión en los extremos, y pueden entonces ser reemplazadas por un par de resortes, tal como se ilustra en la Fig. 2.(c). La cimentación de Vlasov queda reducida entonces a una modificada de Winkler en la cual la rigidez de la viga se altera un poco para tener en cuenta la rigidez de la capa de cortante y se colocan además en los extremos un par de resortes que representan la continuidad de la capa.

Por lo anterior, una cimentación de Winkler en la cual la rigidez de los resortes varíe según su posición puede representar de una manera adecuada no solo la cimentación de Vlasov sino otros modelos mas elaborados, como los basados en el medio elástico semi-infinito por ejemplo.

Con respecto al procedimiento directo de interacción que plantea Hemsley (1990) requiere de un mayor número de operaciones que el directo propuesto por Gómez (1989), ya que según éste último no hay que invertir ninguna matriz para obtener el resultado, además de que es posible controlar directamente en el proceso de solución los casos en que el problema es no lineal, es decir, cuando hay presiones negativas o cuando se alcanzan los niveles de plastificación del suelo. Se anota como desventaja que la matriz de coeficientes de la ecuación (13) no es simétrica.

El procedimiento iterativo que considera separadamente la estructura y el suelo es especialmente apropiado para resolver en microcomputadores problemas con muchos grados de libertad. Se aprovechan de una parte las ventajas numéricas del modelo de Winkler y se tiene por otro lado un procedimiento racional para evaluar la magnitud y variación del módulo de subrasante del suelo.

PROPUESTA PARA REALIZAR UN ANALISIS DE INTERACCION

Una de las dificultades que se encuentran para realizar un análisis de interacción es que el software comercial no cuenta generalmente con esta opción.

A continuación se propone un método práctico para efectuar análisis de interacción suelo-estructura de pórticos apoyados en zapatas aisladas, usando programas comerciales convencionales. Mediante el método se pueden calcular los esfuerzos internos en el pórtico debidos a posibles asentamientos diferenciales, mas no así los esfuerzos en la cimentación.

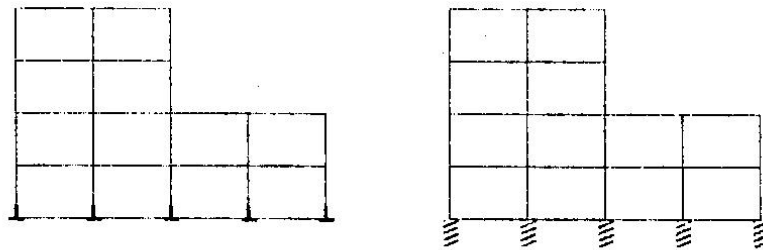


Fig.1. Pórtico equivalente para análisis de interacción

La propuesta consiste en suponer en la parte inferior de la estructura la existencia de columnas virtuales que desempeñan el papel de los resortes del modelo de Winkler. Las dimensiones de estas columnas deben calcularse de acuerdo con las propiedades y geometría del sistema, y luego deben ajustarse con el procedimiento iterativo descrito anteriormente, según la estratigrafía del suelo. Los desplazamientos laterales de la base se pueden cancelar especificando rigideces externas en ese nivel.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El modelo de Winkler con un módulo de subrasante variable describe adecuadamente el comportamiento del suelo. La determinación de la magnitud y variación del módulo se logra con un proceso iterativo mediante el uso de programas comerciales.
2. Los otros modelos simplificados, es decir los de Vlasov o Pasternak y el de Kerr, no representan ninguna ventaja significativa respecto del modelo de Winkler. Además tienen la dificultad adicional de cómo relacionar varios parámetros (2 y 3) con las propiedades del sistema suelo-estructura.
3. El procedimiento directo propuesto por Gómez (1989) parece seguir siendo el más eficiente computacionalmente. No requiere de inversión de matrices y permite además el fácil manejo de presiones de contacto negativas y presiones máximas de plastificación. Tiene como desventaja el que la matriz de coeficientes no es simétrica.
4. Con el método del radio de influencia la matriz de flexibilidad del suelo se convierte artificialmente en una matriz de banda. Sin embargo, el uso de este método no se recomienda ya que la validez de los resultados depende del problema en consideración.
5. El procedimiento iterativo que considera separadamente el suelo y la estructura puede implementarse con el uso de programas comerciales. Se requiere por una parte de un programa para modelar la estructura en una cimentación de Winkler con un módulo de rigidez variable, y por otra parte, de un programa que permita calcular asentamientos en el suelo dada una distribución de presiones en su superficie.
6. La alternativa propuesta para considerar el efecto de

interacción adicionando un piso virtual en la base tiene buenas posibilidades de convertirse en una herramienta práctica para el ingeniero. Los autores de este documento adelantan un estudio exhaustivo para emitir recomendaciones válidas.

REFERENCIAS

. Chilton D. y Wekezer J., Plates on Elastic Foundation, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.116, No.11, pp 3236-3241, November, 1990.

. Chiwanga M. y Valsangkar A.J., Generalized Beam Element on Two Parameter Elastic Foundation, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 114, No.6, pp 1414-1427, June, 1988.

. Gomez G., Programa para el cálculo de presiones, asentamientos y solicitaciones internas de un pórtico espacial ortogonal apoyado sobre base flexible. Informe final de investigación sobre interacción estática suelo-estructura, Anexo 6, Universidad del Valle, 1989.

. Hemsley J.A., Elastic Solutions for large matrix problems in foundation interaction analysis, *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2*, Vol. 89, pp 471-494, December, 1990.

. Huertas L.E., Elementos finitos aplicados a vigas flotantes en medio elástico, *Quintas Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia*, Bogotá, 1985.

. Perez F.J., Interacción Suelo-Estructura, *Memorias I Encuentro Suelo-Estructura*, Universidad de Medellín, 1985.

. Salvá P.J., El uso del computador en los análisis de ISE,

Memorias I Encuentro Suelo-Estructura. Universidad de Medellín, 1985.

. Sirosh S. y Ghali A., Reinforced Concrete Beam-Columns and Beams on Elastic Foundation, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.115, No.3, pp 666-682, 1989.

. Ping B. Y. y Mockry E. F., Beam on Elastic Foundation Finite Elements, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.110, No.10, pp 324-339, February, 1984.

. Vallabhan C. V. y Das Y.C., Modified Vlasov Model for Beams on Elastic Foundation, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 6, pp 956-966, June, 1991.

. Villafañe G., Gomez G. y Garcia J.J., *Interacción Estática Suelo-Estructura de Cimientos Superficiales*, Informe final de Investigación, Universidad del Valle, 1989.

. Zienckiewicz y Taylor, *The Finite Element Method. Volume 1, Fourth edition*, McGraw Hill Book Company, London, 1989.

. Zeevaert L., *Interacción Suelo-Estructura de Cimentaciones Superficiales y Profundas, sujetas a cargas estáticas y sísmicas*, Editorial Limusa, Mexico, 1980.

PRIMER ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS
Y ESTRUCTURAS.

"VIGAS DE AMARRE Y ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES"

por, Luis Fernando Osorno R.*

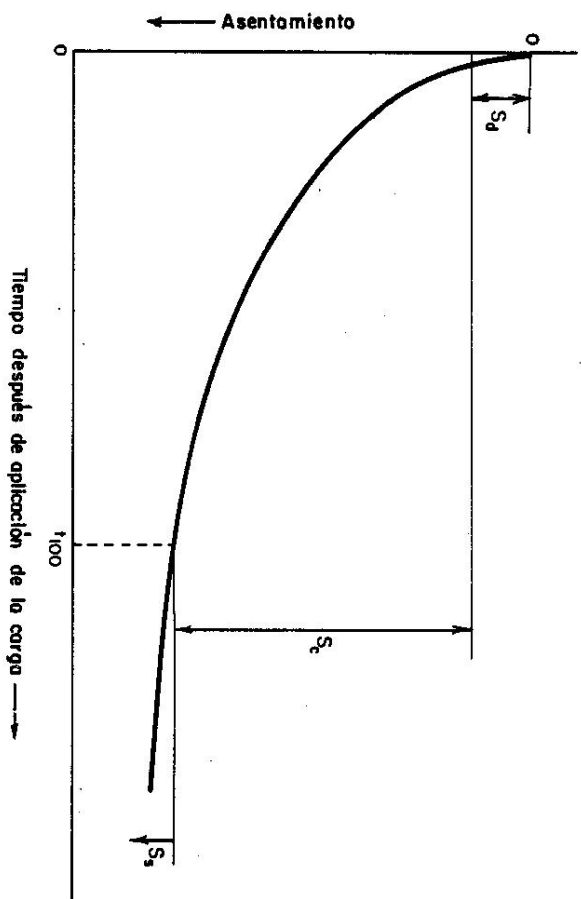
I. INTRODUCCION.

El criterio básico que generalmente controla el diseño de fundaciones es el que los asentamientos no deben exceder un determinado valor permisible, el cual varía de estructura a estructura.

Para garantizar que el anterior criterio se cumpla a cabalidad deben hacerse dos consideraciones fundamentales. En primer término, hay para toda fundación un valor del esfuerzo aplicado para el cual las deformaciones comienzan a hacerse muy grandes y prácticamente imposibles de predecir. La carga correspondiente a este nivel de esfuerzos o este esfuerzo como tal es lo que corrientemente se llama capacidad de carga. La fundación debe diseñarse de tal modo que el esfuerzo real aplicado al suelo sea menor que la capacidad de carga con un margen de seguridad adecuado. Debe llamarse la atención sobre los términos "DEFORMACIONES MUY GRANDES" y "PRACTICAMENTE IMPOSIBLES O DIFICILES DE PREDECIR" en cuanto que ellos involucran el criterio ingenieril.

En segundo lugar, después de establecer la capacidad de carga y asegurarse de que ella supera con suficiente margen de seguridad los esfuerzos estimados que actuarán sobre el suelo de fundación, debe estimarse el asentamiento que ocurrirá bajo la carga prevista y compararlo con los valores límite establecidos de acuerdo con el tipo de estructura.

* Ingeniero Civil U.N.- Bogotá
M.S.- Colorado State University
Gerente de Investigaciones Geotécnicas
Solingral Ltda.



Curva de asentamiento Vs tiempo para un punto típico del subsuelo

FIGURA Nº 1

Retomando los conceptos anteriores pueden resumirse en tres los pasos principales en los trabajos evaluativos para diseño de una fundación:

1. Selección de un factor de seguridad contra una falla por corte del suelo y establecimiento del asentamiento máximo permisible.
2. Determinación de la capacidad de carga del suelo y del factor de seguridad real para las solicitaciones de carga previstas.
3. Estimación del asentamiento y su comparación con el asentamiento máximo permisible.

II. COMPONENTES DE ASENTAMIENTO.

La historia o registro del asentamiento con el tiempo de un punto dentro de la masa de suelo bajo una fundación o una estructura de tierra se ilustra esquemáticamente en la figura No. 1.

Se ha encontrado conveniente considerar el asentamiento total del punto como la suma de tres componentes, tal como se indica en la figura:

$$S = S_d + S_c + S_s \quad (1)$$

En donde

S = Asentamiento total

S_d = Asentamiento instantáneo o por distorsión

S_c = Asentamiento por consolidación

S_s = Asentamiento por compresión secundaria

La componente de asentamientos instantáneos o inmediatos es aquella porción del asentamiento que ocurre de un modo concomitante con la aplicación de la

carga y principalmente como consecuencia de la distorsión volumétrica en el suelo de fundación. El asentamiento por distorsión generalmente no es elástico a pesar de que se calcule utilizando teorías elásticas.

Las otras dos componentes resultan de la expulsión gradual del agua de los vacíos del suelo y de la compresión del esqueleto mineral. La diferenciación entre asentamientos por consolidación y asentamientos por compresión secundaria está basada en los procesos físicos que controlan la tasa de asentamiento en el tiempo. Los asentamientos por consolidación se refieren a los ocurridos fundamentalmente por consolidación primaria, ésto es, a aquellos en que la tasa de deformación o cambio volumétrico con el tiempo está controlada por la velocidad con la que el agua puede ser expulsada de los vacíos del suelo a medida que se disipa el exceso de presión de poros generado en el proceso. En los asentamientos por compresión secundaria, la velocidad está controlada en gran medida por la tasa a la que el esqueleto mineral cede y se comprime a esfuerzo efectivo esencialmente constante. La transición entre estos dos procesos en el tiempo se ha identificado como el instante en el que el exceso de presión de poros se hace nulo.

Comoquiera que la respuesta de los suelos a la aplicación de carga no es lineal debe tenerse en cuenta que la superposición que está implícita en la ecuación (1) en general no tiene validez pero sirve para ilustrar el fenómeno de los asentamientos y para efectuar estimativos razonables de ellos, considerando además que hay diferencias en las escalas de tiempo y en la magnitud de los cambios volumétricos para los diferentes tipos de suelos presentes en la naturaleza.

III. ASENTAMIENTO TOLERABLES.

Los asentamientos en prácticamente todo tipo de estructura pueden ser importantes aunque no haya rotura inminente, en la medida en que están relacionados con la apariencia, el funcionamiento y los daños que se le puedan ocasionar a la misma.

Los asentamientos pueden afectar la apariencia de una edificación al ocasionar grietas en la mampostería exterior e interior. De igual modo pueden hacer que se produzcan inclinaciones suficientemente grandes como para ser advertidas por el ojo humano.

También los asentamientos pueden interferir con el funcionamiento de una estructura de muchas formas, en especial en el caso de grúas, bombas, unidades de rastreo, radares y otros equipos en los que las exigencias de alineamiento son altas.

Finalmente, a pesar de que el factor de seguridad contra falla por corte sea alto en una fundación dada, asentamientos excesivos pueden conducir a falla estructural o a colapso de la estructura.

Algunos de los tipos de asentamiento se ilustran en la figura No. 2.

Los asentamientos no uniformes pueden ocurrir por:

- a- Esfuerzos uniformes sobre un estrato homogéneo
- b- Aplicación de esfuerzos no uniformes
- c- Condiciones no homogéneas del subsuelo

El asentamiento diferencial entre dos puntos, definido como la diferencia entre el mayor y el menor, está caracterizado también por la DISTORSION ANGULAR (δ/L) que es el cociente entre el asentamiento diferencial entre los dos puntos y la distancia horizontal entre ellos.

El asentamiento que una estructura puede tolerar depende de muchos factores entre los que se destacan el tipo, tamaño, localización y función de la estructura por una parte, y patrón, tasa, cauce y fuente del asentamiento por la otra.

En las estructuras la sensibilidad frente a los asentamientos crece con la rigidez, con la hiperestaticidad y en particular con la fragilidad de los elementos que las conforman.

Una estructura en mampostería es más sensible a los asentamientos que una aporticada, y esta última a su vez construida en concreto reforzada es más sensible que su análoga en acero.

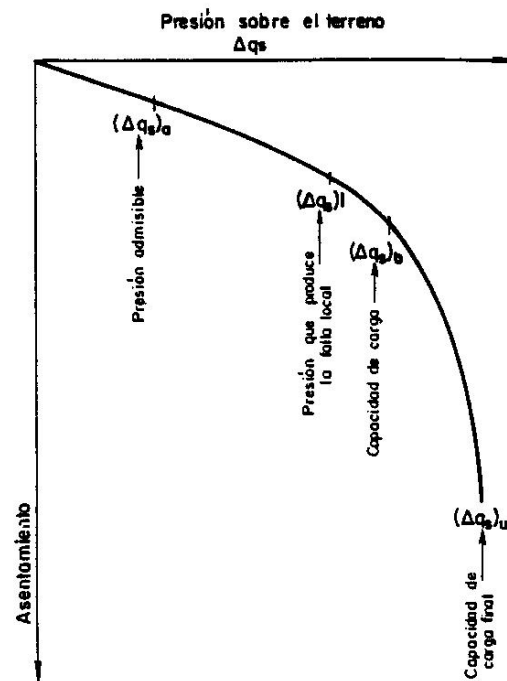
Aunque existen muchos criterios y tablas en los códigos de construcción y en la literatura sobre el tema, pueden tomarse como guía los siguientes valores límite de distorsión angular:

TABLA No. 1

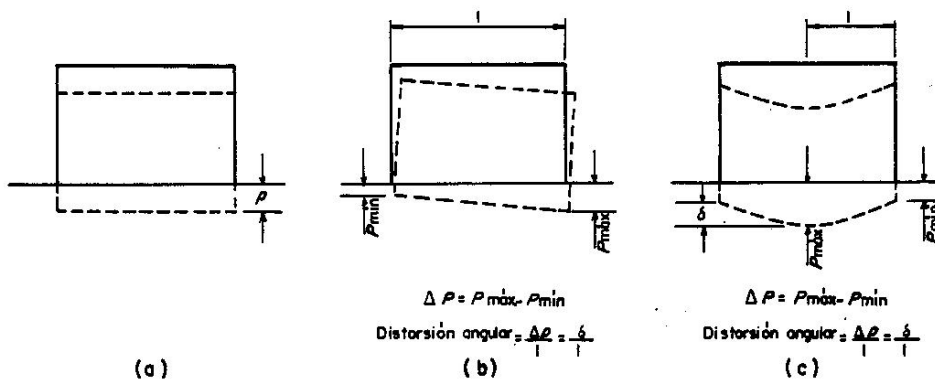
Tipo de estructura	Valor límite de deformación angular
- Pórticos en concreto reforzado	1/300
- Pórticos de acero	1/250
- Mampostería simple	1/1000
- Mampostería en concreto	1/500
- Mampostería reforzada	1/800

IV. CORRECCION DE ASENTAMIENTOS POR RIGIDEZ ESTRUCTURAL Y EMPLEO DE LAS VIGAS DE ENLACE.

En las estimaciones convencionales de asentamientos se asume que cada una de las fundaciones o elementos de la fundación actúa libremente, completamente desligada de las otras, es decir, considerando desde el punto de vista del cálculo que se trabaja con una estructura completamente flexible. Sin embargo, tal consideración

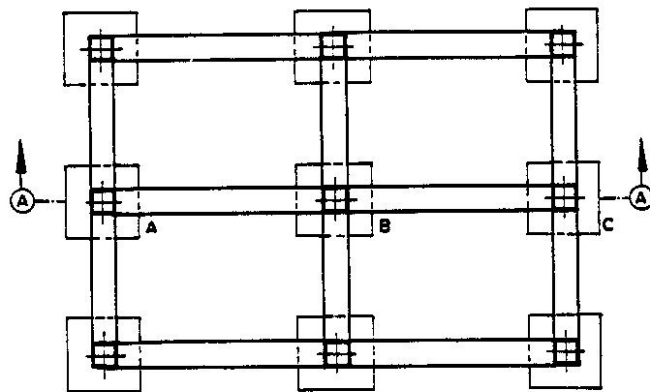


Relación entre las presiones sobre el terreno y las capacidades de carga

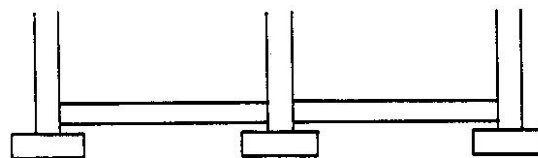


Tipos de asentamiento: a) Asentamiento uniforme. b) Vuelca. c) Asentamiento no uniforme

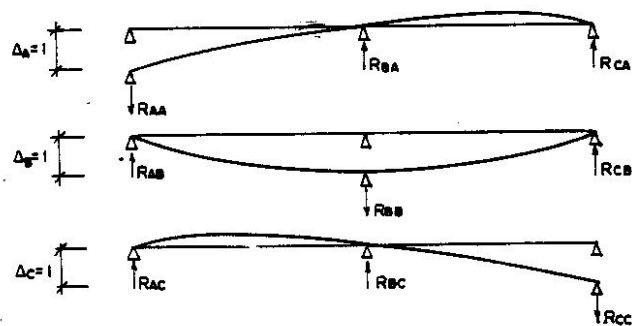
FIGURA N° 2



PLANTA



SECCION TRANSVERSAL



Efectos de Asentamiento. Efectos sobre vigas

FIGURA N° 5

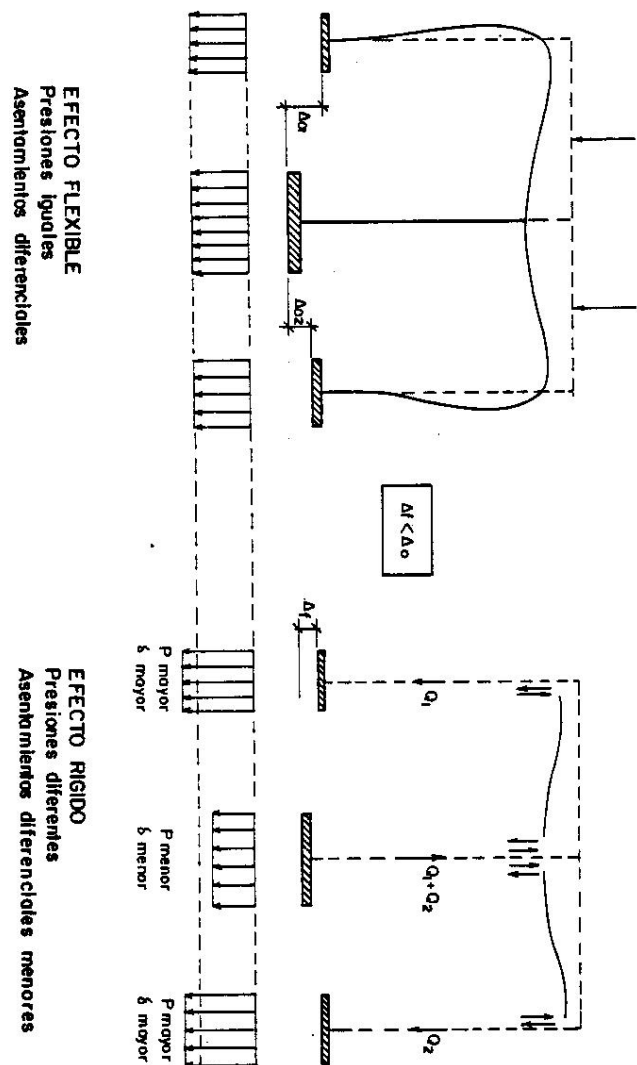


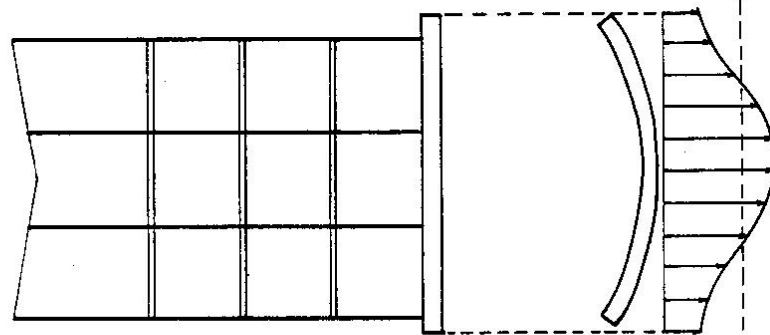
FIGURA N° 4

no se ajusta al comportamiento real de la estructura en cuanto que ésta interviene directamente en el amortiguamiento de los asentamientos diferenciales al redistribuir las cargas; cualquier asentamiento diferencial genera deformaciones en la estructura que a su vez hacen que las cargas se redistribuyan reduciendo el efecto de deformación sobre el suelo, siempre y cuando no se excedan los límites de tolerancia estructural de los elementos encargados de asumir esa redistribución.

Aunque puede ser razonable desde el punto de vista de un incremento en los factores de seguridad el adelantar los estimativos de asentamiento bajo la consideración de estructura flexible, no lo es menos que la rigidez de la estructura interviene en la respuesta del terreno ante la aplicación de cargas y como tal debería tenerse en cuenta para ciertos casos. En los esquemas de las figuras Nos. 3 y 4 se ilustra de un modo simplificado el efecto de modificación de las presiones por efecto de la redistribución de cargas.

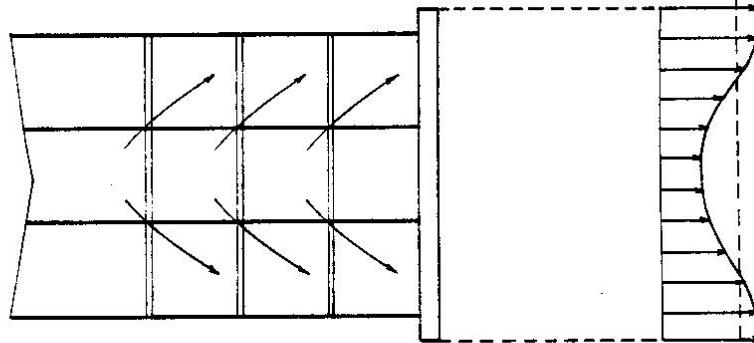
En una estructura aporticada las cargas de cada una de las columnas son diferentes, por lo que en el caso de cimentaciones superficiales en zapatas aisladas se tendrán áreas de fundación diferentes para presiones de contacto aproximadamente iguales. Si además de la diferencia en área de las zapatas, que de por sí implica asentamientos distintos para una misma presión, se tienen en cuenta las variaciones propias de compresibilidad del subsuelo, es clara la ocurrencia de asentamientos diferenciales en la mayoría de los casos. Ocurre entonces que la estructura redistribuye las presiones descargando el sector de mayor asentamiento para aumentarlas en los puntos de menor deformación.

Lo anterior puede entenderse más claramente al vincular las vigas de enlace de los cimientos al cálculo de los desplazamientos verticales. Samuel Chamecki propuso el método de la rigidez estructural para el cálculo de asentamientos considerando las vigas de enlace como elementos importantes de rigidización de la estructura.



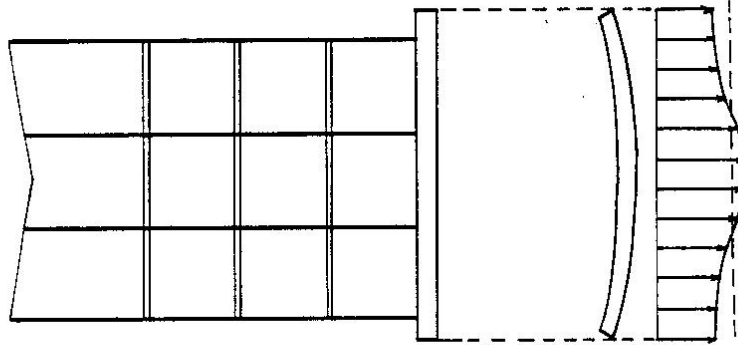
(a)

Efecto Flexible



(b)

Efecto Estructural de Rigidez



(c)

Efectos Corregidos

Al considerar un entramado de vigas de enlace como el indicado en la figura No. 5 que unen un conjunto de zapatas aisladas, en donde:

δ_i^k = Asentamiento total en el punto i en la iteración de corrección k.

Δ_{ij}^k = Asentamiento diferencial del punto i respecto al punto j.

R_{ij} = Fuerza de equilibrio producida en el punto i por un desplazamiento unitario en j considerando indeformables los otros puntos en la iteración de corrección k.

y siendo $\Delta_{ij}^k = \delta_i^k - \delta_j^k$

y P_i = La carga proveniente de la estructura en el punto i.

Chamecki propone la ejecución de correcciones sucesivas de los desplazamientos en tantas iteraciones como sean necesarias para los niveles requeridos de precisión. El efecto del desplazamiento en un punto va disminuyendo en los otros puntos a medida que se alejan.

La metodología de cálculo propuesta por Chamecki podría resumirse en los siguientes pasos:

1. Cálculo de los asentamientos considerando la estructura completamente flexible bajo una presión de contacto P_i .
2. Establecimiento de los asentamientos diferenciales.

3. Cálculo de las fuerzas corregidas en cada fundación.

$$N_i^1 = P_i - \sum_{j=1}^n R_{ij} \Delta_{ij}^0$$

4. Cálculo de la nueva presión de contacto P_i^1

$$P_i^1 = \frac{N_i^1}{A_i} \quad (\text{Presión de contacto en la fundación } i \text{ en la corrección 1}).$$

5. Nuevo cálculo de asentamientos con las presiones modificadas.

$$\Delta_{ij}^1 = \delta_i^1 - \delta_j^1$$

6. Nueva corrección de fuerzas en cada fundación.

$$N_i^2 = P_i^1 - \sum R_{ij} \Delta_{ij}^1$$

7. Continuación de las iteraciones hasta conseguir la precisión requerida.

Finalmente se comparan los asentamientos tanto totales como diferenciales con los admisibles para así definir la capacidad de soporte definitiva.

Las vigas de enlace en fundaciones aisladas cumplen más de una función y se constituyen en elementos fundamentales para la rigidización de la estructura. Como tales intervienen en el control de asentamientos y en el control de desplazamientos laterales de los cimientos bajo solicitaciones de carga horizontal, principalmente en eventos sísmicos.

Dentro de las funciones secundarias de las vigas de enlace pueden mencionarse la reducción de esbeltez en columnas, la atención de excentricidades, la rigidización del sistema subestructural, la corrección de excentricidades en pilas o pilotes, el arriostramiento lateral de pilas o pilotes, como elemento de conexión en cimientos medianeros y para el control de desplazamientos horizontales de zapatas en media ladera.

Como puede verse, la multiplicidad de funciones que pueden asumir en un momento dado las vigas de enlace las hacen un elemento estructural de primerísima importancia; son embargo, de todas esas funciones, son las de restricción a los desplazamientos horizontales y verticales las primeras por lo que el diseño de estos elementos debe hacerse con la rigidez adecuada dentro de los criterios clásicos de seguridad, funcionalidad y economía del conjunto.

BIBLIOGRAFIA.

- 1- Bowles, Joseph E. "Foundation Analysis and Design", Mc Graw Hill International Editions, N.Y. 4th ed, 1988.
2. Chamecki S., "Structural Rigidity in calculating settlements", ASCE. Soil Mechanics and Foundation Division, Jan. 1956.
3. Das, Braja M. "Advanced Soil Mechanics", Mc Graw-Hill Book Co, N.Y., 1983.
4. "Foundation Engineering Handbook", edited by Hans F. Winterkorn and Hsai-Yang Fang., Van Nostrand Reinhold Co, N.Y. 1975.
5. Johnson, S. and Kavanagh, T. "The Design of Foundations for Buildings", Mc Graw Hill, N.Y., 1968.
6. Lambe, T. William and Whitman, Robert V. - "Soil Mechanics", John Wiley and sons, Inc., N.Y.
7. Perloff, W.H. and Baron, W. "Soil Mechanics: Principles and Applications", Ronald Press, N.Y.
8. Zeevaert, L. "Foundation Engineering for difficult subsoil conditions" Van NOSTRAND REINHOLD Co, 1rst ed., N.Y., 1972.