

SEGUNDO ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS

Santafé de Bogotá, 15 al 17 de Septiembre de 1993

ALGUNAS APLICACIONES DEL ANALISIS
DE INTERACCION ESTATICA SUELO
ESTRUCTURA
DE CIMIENTOS SUPERFICIALES

César Freddy Gil S., IM ¹

José Jaime García A., IM, M.Sc. ²

Germán A. Villafañe R., IC, M.Eng. ³

Introducción

En el diseño de estructuras cimentadas superficialmente generalmente no se tienen en cuenta los hundimientos diferenciales de los cimientos. Esto se debe principalmente a que no existen en el mercado programas comerciales que efectúen el difícil procedimiento de acoplamiento entre las ecuaciones del suelo y de la estructura, proceso que se denomina de interacción estática suelo-estructura. Además, los programas de computador que han sido desarrollados en las universidades para resolver este problema no son fáciles de adquirir, entender y aplicar.

Si los desplazamientos diferenciales causados por hundimientos en los cimientos son grandes se generan fuerzas internas considerables que deberían tenerse en cuenta durante el diseño. De otro lado, la rigidez de los cimientos y de la superestructura ocasiona una redistribución de las presiones sobre el suelo, la cual modifica a su vez la distribución de los hundimientos y las fuerzas en los cimientos y en la superestructura.

¹ *Candidato al título de especialista en estructuras, U. del Valle.*

² *Profesor de estructuras, Universidad del Valle.*

³ *Profesor de geotecnia, Universidad del Valle.*

Muchos métodos han sido propuestos para realizar estudios de interacción estática suelo estructura (ver recuento en Gómez G. y García J. J. 1991). En este artículo se describe primero un procedimiento para analizar la interacción estática entre el suelo y la estructura que puede ser usado fácilmente por los diseñadores estructurales ya que se implementa mediante programas comerciales de análisis de estructuras.

Según el mencionado procedimiento la cimentación y la superestructura se modelan mediante cualquier programa comercial que tenga en su librería elementos resorte. Los hundimientos del subsuelo se calculan mediante el programa de computador JAGI listado en el anexo (Gómez 1989). Para garantizar que los hundimientos del suelo y la estructura sean iguales en la frontera común se efectúa un procedimiento iterativo para corregir sucesivamente los módulos de rigidez de los resortes en que se apoyan los cimientos.

Mediante el mencionado procedimiento propuesto, que en los dos últimos años ha sido utilizado en los proyectos de clase en la Universidad del Valle se realizaron los estudios de interacción de dos edificios de la ciudad de Cali. En cada caso se describen la superestructura y la cimentación y las propiedades geotécnicas del subsuelo; se presentan los hundimientos inmediatos calculados y se comparan con aquellos medidos durante la construcción de los edificios; se comparan las fuerzas internas con las obtenidas mediante análisis convencionales (sin interacción); y al final se presentan los resultados y conclusiones más relevantes de los dos casos.

Procedimiento

El procedimiento propuesto para realizar el análisis de interacción suelo estructura es el siguiente:

1. Se dimensionan los elementos de la superestructura por los métodos convencionales del diseño estructural. El espesor de las zapatas o la losa de cimentación generalmente se escoge para restringir el máximo esfuerzo cortante en el concreto al nivel permitido por el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes (1984). Las técnicas de construcción de cada región, el costo de los materiales y de la mano de obra, el espaciamiento de columnas, los sótanos y las subpresiones también influyen en la escogencia del tipo de losa de cimentación y su espesor.

2. Se modelan la cimentación y la superestructura mediante cualquier programa comercial (ALGOR, COMBAT, SAP90, etc.) que tenga en su librería el elemento resorte. En este trabajo se usó el programa ALGOR (1990) de elementos finitos, el cual supone un comportamiento lineal elástico de la estructura. En la cimentación se disponen elementos resorte cuya rigidez

(fuerza/longitud) se puede suponer de cualquier magnitud e igual en todos ellos en la primera iteración. También pueden iniciarse las iteraciones con las rigideces calculadas para los resortes con base en los hundimientos esperados en los cimientos para las presiones promedias, según los análisis convencionales de la mecánica de suelos.

Generalmente la respuesta de la estructura a largo plazo, en condiciones drenadas del subsuelo, es la que más interesa. Sin embargo, en el caso de estructuras cimentadas sobre depósitos profundos de arcilla su respuesta a corto plazo también puede ser de interés y el análisis debe basarse en la compresibilidad no drenada del subsuelo. En los dos casos de este trabajo se presentan los resultados del análisis a corto plazo realizados con parámetros no drenados del subsuelo.

3. Se modela el subsuelo de soporte mediante el módulo JAGI, cuyo listado se anexa al final de este artículo, desarrollado en la Universidad del Valle por Gómez (1989) durante la investigación "Interacción Estática Suelo Estructura de Cimientos Superficiales" (Villafañe G. et. al. 1989).

JAGI modela el subsuelo como un medio elástico, continuo y estratificado horizontalmente; el modelo no considera el comportamiento inelástico del subsuelo que se puede presentar especialmente bajo los bordes de cimientos sobre depósitos arcillosos en donde las reacciones elásticas pueden exceder a la presión de plastificación del subsuelo.

JAGI calcula las presiones transmitidas por el cimiento al subsuelo mediante la teoría elástica de Boussinesq. La compresibilidad no drenada del subsuelo se representa en este trabajo mediante el parámetro de compresibilidad volumétrica m_v .

4. Se realiza la primera iteración con el programa de análisis estructural con la cual se obtiene la primera distribución de reacciones y hundimientos en los resortes que representan la rigidez del subsuelo.

5. Se calculan mediante el módulo JAGI los hundimientos del subsuelo debidos a la distribución de presiones definida por las reacciones en los resortes que se calcularon en el paso anterior. Si estos hundimientos calculados mediante JAGI coinciden con aquellos calculados en el paso anterior el procedimiento termina.

6. Si los hundimientos obtenidos en los pasos 4 y 5 son diferentes se recalculan los módulos de rigidez de los resortes como el cociente de las reacciones en ellos obtenidos en el paso 4 y los hundimientos calculados mediante JAGI en el paso 5. Se repiten los pasos 4 y 5 hasta que los hundimientos del cimiento y del subsuelo se aproximen. El procedimiento se ilustra gráficamente en la Figura 1.

Los cálculos de este trabajo se efectuaron utilizando un microcomputador con procesador 486, 8 Mb de memoria RAM y 120 Mb en disco duro.

Caso 1

El caso 1 se refiere a un edificio cuya construcción se inició en el mes de noviembre de 1992, de catorce pisos, localizado al suroccidente de la ciudad de Cali en un sector de creciente desarrollo urbanístico. Para la realización de este trabajo el diseñador estructural y los constructores amablemente suministraron los planos y los registros de los hundimientos de la estructura.

Modelo del subsuelo

El subsuelo del lote está constituido por materiales aluviales pertenecientes al cono del río Meléndez, con proporción variable de arcillas, arenas, gravas y cantos rodados. Se encuentran capas alternadas de limos arcillosos de color amarillo rojizo y café, de consistencia media a dura, con capas de arcilla gris y bolsas de arenas y gravas limosas densas de color gris. Las aguas subterráneas aparecen a los 3.50 m a partir del nivel del terreno natural.

Para modelar el subsuelo la estratificación se simplifica en dos capas: la capa 1 entre los niveles 0.0 a - 6.0 m y la 2 de - 6.0 a - 18.6 m. Por debajo del nivel - 18.6 m el subsuelo se considera incompresible para las cargas transmitidas por la edificación.

El módulo de elasticidad E_u , y por tanto la compresibilidad volumétrica m_v de cada capa, se estimó de correlaciones con su resistencia no drenada (Williams Ch. E. 1988). La resistencia no drenada q_u de la capa 1 se midió en el laboratorio mediante pruebas de resistencia a la compresión confinada; la de la capa 2 se obtuvo por correlación con los índices de penetración estándar SPT (ASTM D-1596).

El subsuelo se modela mediante el programa JAGI para las dos capas y los valores de m_v mostrados en la Figura 2. La rigidez de los resortes para iniciar las iteraciones se calculó con el área de cada elemento multiplicada por un módulo de reacción del subsuelo de 325 t/m³ para el centro de la cimentación y de 650 t/m³ para los bordes.

Modelo de la cimentación y la superestructura

La estructura del edificio consiste en un sistema de pórticos espaciales de concreto reforzado, con 14 losas de 0.40 m de altura aligeradas con casetones de guadua. Las columnas transfieren las cargas a una losa de cimentación igualmente aligerada, armada en una dirección, con vigas principales de 1.30 m de altura. El edificio tiene un semisótano para parqueaderos en el nivel - 1.70 m.

La presión bruta promedio que la losa de cimentación transmite al nivel - 3.0 m, con el 100% de su carga de servicio, es de 21.0 t/m². La presión neta promedio, por efecto de la excavación del semisótano, es de 15.6 t/m².

El modelo de la cimentación y de la superestructura analizado mediante el programa ALGOR está compuesto de 1273 nudos, 142 elementos resortes, 890 elementos placa y 840 elementos viga. En las Figuras 3 y 4 se muestran vistas isométricas del modelo estructural. Se aprovecha la simetría del conjunto por lo que el modelo corresponde a la mitad del edificio. En la etapa inicial también se modeló la cimentación mediante elementos ladrillo (brick elements), pero no se siguieron utilizando ya que se obtuvieron resultados sensiblemente iguales a aquellos del modelo mediante elementos placa.

Resultados

Para estudiar la convergencia del método iterativo se calcula la norma L definida de la siguiente manera

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$$

donde n es el número de nodos de la cimentación; a_i es el hundimiento del nodo i del cimiento obtenido mediante el programa ALGOR; y b_i el hundimiento del nodo i del suelo obtenido mediante el módulo JAGI. Un valor de L cercano a cero indica que los hundimientos de la estructura y del suelo obtenidos mediante los dos programas son aproximadamente iguales.

En la Figura 5 se muestran los valores de la norma L para cada iteración. Las dos curvas corresponden a los modelos con elementos placa y elementos ladrillo en la base. Como se puede observar, en este caso el procedimiento converge rápidamente y los valores de la cuarta iteración son prácticamente iguales a los de la sexta. Además, los hundimientos de la tercera iteración son aproximadamente iguales a los de la sexta y podrían utilizarse para fines prácticos.

En la Figura 6 se muestran los contornos de hundimientos inmediatos (elásticos) de la cimentación, es decir las curvas de hundimiento constante, calculados en la última iteración para condiciones no drenadas del subsuelo con el 100 % de la carga bruta de servicio en la estructura. Se deduce que la distorsión angular de la cimentación está en el rango entre $1/1600$ y $1/800000$, lo cual indica que la rigidez relativa de la cimentación y la superestructura, y especialmente la geometría de la cimentación, contribuyen significativamente a que los hundimientos sean muy uniformes.

Estos resultados son similares a los mostrados en la Tabla 1, obtenidos de las mediciones de los hundimientos de la cimentación del edificio hasta el 12 de junio pasado cuando las cargas de la estructura eran el 82 % de la carga bruta de diseño. Para comparar estas mediciones con los hundimientos inmediatos calculados en la última iteración se debe tener en cuenta que cuando se hicieron las mediciones ya se había iniciado el proceso de drenaje y la correspondiente disipación de los excesos de presión de poros (condición parcialmente drenada del suelo).

Tabla 1. Caso 1. Hundimientos medidos (Junio 12/93)

<u>Nodo</u>	<u>Hundimiento (m)</u>
1	0.024
16	0.024
23	0.018
27	0.016
97	0.021
104	0.021
108	0.018

Es interesante observar cómo la geometría de la cimentación contribuye a que en los nodos 78, 93, 108, 116, 124 y 131 del eje 2 (Figura 4), que son nodos interiores, se presente una mayor influencia de las presiones en las áreas adyacentes, por lo cual los módulos de rigidez de estos resortes (Figura 7) resultan ser menores que aquellos de los otros nodos del eje 2 que se encuentran localizados en el perímetro o en las esquinas de la cimentación. Una consideración similar aplica para las rigideces finales en el eje 3 (Figura 8).

En las Figuras 9 y 10 se presentan los diagramas de momentos para las vigas de los ejes 2 (nodos 8-142) y 3 (nodos 1-120) de la losa de cimentación obtenidos según las siguientes hipótesis: 1. última iteración realizada; 2. presión (reacción) uniforme del subsuelo (21.0 t/m^2); 3. resortes de rigidez constante.

En los diagramas de momentos de la Figura 9 se observan diferencias entre un 20-50 % en los valores máximos positivos y negativos obtenidos según las hipótesis 1 y 2 mencionadas anteriormente y diferencias muy significativas con la hipótesis 3 de rigidez constante en los resortes. En los diagramas de la Figura 10 se observan

diferencias mayores del 50 % en los momentos máximos positivos y negativos para las 3 hipótesis consideradas.

Estos resultados son típicos de losas de cimentación con hundimientos relativamente uniformes (rígidas), ya que las presiones (reacciones) se incrementan considerablemente en los bordes del cimiento, tal como lo indican las Figuras 7 y 8 donde se muestra la variación de la rigidez de los resortes de los ejes 2 y 3 para la última iteración. Debe tenerse en cuenta que la rigidez de la cimentación hace que la distribución de reacciones en los resortes sea aproximadamente igual a la distribución de rigidez en los elementos resorte.

Caso 2

Este caso se refiere a un edificio multifamiliar de diez y seis pisos construido en el año de 1989, localizado al suroccidente de la ciudad de Cali.

Modelo del subsuelo

El subsuelo del lote que está constituido por arcillas y limos arcillosos aluviales pertenecientes a la planicie de inundación del río Cauca, posiblemente modificados por el río Cañaveralejo, está caracterizado por una secuencia de mantos Cuaternarios de considerable espesor.

Hasta la profundidad explorada se encuentran capas alternadas de limos arcillosos (MH) de color amarillo y vetas grises con capas de arcilla (CH) gris con vetas amarillas, preconsolidadas, de mediana consistencia y compresibilidad.

Los parámetros de compresibilidad de los estratos simplificados del subsuelo se obtuvieron con una metodología similar a la del caso 1 y se muestran en la Figura 11. Se estima que después de los 30 m de profundidad las deformaciones del subsuelo producidas por las cargas de la edificación no son significativas (profundidad crítica).

El subsuelo se modela mediante el programa JAGI para las cuatro capas y los valores de m_v mostrados en la Figura 11. El módulo de rigidez de cada uno de los resortes se escogió de una manera arbitraria igual a 400 t/m con lo cual se pretende estudiar el comportamiento del método iterativo dado cualquier módulo de rigidez inicial.

Modelo de la cimentación y la superestructura

La estructura de pórticos en concreto reforzado tiene diez y seis losas aligeradas por encima del nivel del terreno, de 0.40 m de altura, y dos niveles de sótanos. Está cimentada sobre una losa de forma rectangular aligerada con casetón de guadua, con vigas principales de 2.20 m de altura y viguetas de 1.60 m.

Las cargas estructurales se transmiten a la losa de cimentación mediante columnas rectangulares y pantallas de cortante distribuidas asimétricamente, algunas de las cuales forman los fosos de los ascensores. En el extremo norte, el muro de contención de los sótanos se apoya sobre la losa de cimentación.

La presión bruta promedio que la losa de cimentación transmite al subsuelo en el nivel - 6.60 m, con el 100 % de la carga de servicio, es de 16.0 t/m². La presión neta promedio a nivel de cimentación, por efectos de la excavación para los sótanos, es 4.8 t/m².

El modelo completo de la estructura consta de 3903 nodos, 3151 elementos placa, 1417 elementos viga y 307 elementos resorte. En las Figuras 12, 13 se muestran vistas isométricas del modelo estructural. Se aprovecha la simetría del conjunto por lo que el modelo corresponde a la mitad del edificio. En la Figura 14 se indican los elementos del modelo de la cimentación.

En este caso se analizó primero un modelo que consiste en los elementos placa y viga de la cimentación más unos elementos viga ficticios de rigidez grande en los sitios donde llegan las pantallas, a fin de tener en cuenta la rigidez de éstas. Este modelo simplificado no tiene en cuenta la rigidez de los pórticos de la superestructura. Con este modelo se realizaron 6 iteraciones y, posteriormente, con la distribución de rigidez obtenida para los resortes en la sexta iteración se realizaron dos iteraciones con el modelo completo.

Resultados

En la Figura 15 se muestran los valores de la norma L para cada iteración con el modelo simplificado. Se puede observar que el procedimiento converge rápidamente hasta la cuarta iteración, y que la variación de la norma en las iteraciones quinta y sexta no es significativa.

En las dos iteraciones realizadas con el modelo completo, a partir de la distribución de rigidez de los resortes obtenida con la sexta iteración del modelo simplificado, se obtuvieron valores de L iguales a 0.042 y 0.025 lo cual indica en este caso que es una buena aproximación analizar el modelo completo con la distribución de rigidez obtenida en la última iteración del modelo simplificado.

Los hundimientos inmediatos de los nodos 257-273 del eje 1 de la cimentación calculados por JAGI y ALGOR para la primera y sexta iteración se muestran en las Figuras 16 y 17. Nótese la diferencia entre las curvas en la primera iteración y su proximidad en la sexta.

En la Figura 18 se muestran los contornos de hundimientos inmediatos de la cimentación calculados en la segunda iteración del modelo completo con el 100 % de la carga bruta de servicio en la estructura. Se deduce que la distorsión angular de la cimentación está en el rango entre $1/1350$ y $1/450$, lo cual indica que los hundimientos diferenciales de la cimentación son significativos y ocasionan una redistribución importante de momentos, tal como lo indican las Figuras 19 y 20. Nótese que las distorsiones angulares son menores en el área de las pantallas y el muro de contención, pero el hundimiento promedio es mayor en dicha área.

Los hundimientos inmediatos calculados en la última iteración tienen una tendencia similar a los mostrados en la Tabla 2, obtenidos de las mediciones de los hundimientos de la cimentación del edificio cuando las cargas de la estructura eran el 87 % de la carga bruta de servicio. Para comparar estas mediciones con los hundimientos inmediatos calculados en la última iteración se debe tener en cuenta que cuando se hacen las mediciones ya se ha iniciado el proceso de drenaje y la correspondiente disipación de los excesos de presión de poros (condición parcialmente drenada del suelo).

Tabla 2. Caso 2. Hundimientos medidos (Septiembre 30/89)

Nodo	Hundimiento (m)
37	0.039
61	0.046
158	0.040
163	0.043
258	0.025
260	0.025
266	0.039
273	0.042

En la Figura 19 se presentan los diagramas de momentos para la viga del eje 1 (nodos 257-273) de la losa de cimentación, obtenidos según la última iteración realizada y considerando una presión (reacción) uniforme del subsuelo (21.0 t/m^2). Como se puede observar, en la última iteración se obtienen momentos completamente negativos cuyos valores máximos superan hasta en un 100% los momentos obtenidos considerando reacción uniforme del suelo.

En la Figura 20 se presentan los momentos obtenidos en los elementos placa del eje 1' (nodos 206-222). Como puede apreciarse la tendencia

de los gráficos es similar a la que se presenta en la viga del eje 1.

Conclusiones y recomendaciones

Las siguientes conclusiones y recomendaciones se desprenden del presente estudio y se refieren al procedimiento y al análisis de los casos:

1. El procedimiento usado para realizar los análisis de interacción estática suelo estructura permite modelar comportamientos lineales o no lineales de los sistemas suelo estructura con programas comerciales instalados en microcomputadores, con lo cual el ingeniero diseñador tiene la posibilidad real de llevar a cabo estos estudios en los casos en que sea necesario.
2. Aunque los dos casos estudiados se refieren a estructuras con losas de cimentación, el mismo procedimiento es aplicable a estructuras con zapatas aisladas o combinadas.
3. Para modelar el suelo en este estudio se utilizó el programa JAGI, el cual supone un comportamiento lineal elástico. En caso que se desee modelar el suelo con otros programas que consideren no linealidades, el procedimiento también es aplicable, con lo cual las iteraciones se efectuarían entre el programa que modela la estructura con los elementos resorte en la base y el otro programa que modela el suelo con todas las posibles no linealidades.
4. En los dos casos estudiados el procedimiento presentó una buena convergencia. El método usado en el segundo caso, que consistió en realizar las iteraciones con el modelo de la cimentación sin la superestructura para obtener la distribución de rigidez en los resortes y luego con ella analizar el modelo completo, tiene la ventaja de reducir los tiempos de computación. El tiempo para realizar una iteración con el modelo simplificado de la cimentación sin la superestructura es de aproximadamente 10 minutos, mientras que con el modelo completo es de aproximadamente 4 horas.
5. Los parámetros de compresibilidad del suelo obtenidos por correlaciones semiempíricas con su resistencia no drenada permitieron obtener una buena aproximación de las distorsiones angulares inmediatas medidas en los dos casos estudiados.
6. En el primer caso los hundimientos diferenciales calculados y medidos son pequeños, por tanto las distorsiones angulares en la losa de cimentación son mínimas. Esto se debe, por una parte, a la geometría de la cimentación, cuya área se reduce en la zona central que es la que recibe una mayor influencia de las

presiones de todo el conjunto, y por otra, a la gran rigidez relativa de la cimentación y la superestructura.

7. En el segundo caso los hundimientos diferenciales y por tanto las distorsiones angulares son mayores, especialmente en los bordes de la losa y en la zona de columnas, lo cual se debe, por una parte, a la geometría rectangular de la losa, y por otra, a sus voladizos de 3.25 y 3.75 m. En la zona de pantallas y el muro de contención las distorsiones angulares disminuyen pero el hundimiento promedio es mayor.

8. Las diferencias que se obtienen en la distribución de momentos en las vigas de la cimentación entre la hipótesis con interacción y aquella con presión (reacción) uniforme, se deben fundamentalmente a la distribución de la reacción del subsuelo calculada en las últimas iteraciones, con la cual se logra la compatibilidad de hundimientos del suelo y la estructura. Para cargas de servicio en la superestructura la reacción en los extremos de la cimentación es mayor que en el centro, lo que hace que los momentos negativos bajo las columnas aumenten significativamente mientras que los momentos positivos en el centro de la luz disminuyen y llegan a ser incluso negativos como en el caso 2.

9. La distribución de momentos en las vigas de la cimentación en la hipótesis con resortes de rigidez constante (caso 1), obtenida de los análisis sin interacción, es la que más se aleja de la distribución de momentos obtenida del análisis con interacción. Esto se explica ya que el modelo de resortes constantes o modelo de Winkler no tiene en cuenta la continuidad del suelo.

10. Del estudio de los dos casos presentados se puede concluir que mediante el procedimiento propuesto de análisis de interacción suelo estructura se pueden estimar con un buen grado de aproximación tanto los hundimientos y distorsiones angulares esperadas en la cimentación como la reacción del suelo y las fuerzas internas en la cimentación y la superestructura, lo que permite realizar el diseño con bases más racionales.

11. Aunque en este trabajo solamente se presentan las diferencias obtenidas en los momentos de las vigas y placas de la cimentación considerando varios procedimientos de análisis, las diferencias en las fuerzas internas de los demás elementos de la estructura también son importantes.

Agradecimiento

Los autores agradecen la valiosa colaboración de los propietarios, constructores y diseñadores de los edificios estudiados y del Programa de Especialización en Estructuras de la Universidad del Valle. A la ingeniera civil Gloria Llanos, aspirante al título de especialista en estructuras, por su trabajo en la etapa de implementación de los modelos.

Referencias

ALGOR Finite Element Analysis System, "Processor Reference Manual", Pittsburgh, 1990.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes", Bogotá, Junio de 1984.

Gómez G. y García J. J., "Modelos, Procedimientos y Resultados Recientes sobre la Interacción Estática Suelo-Estructura de Cimientos Superficiales", Primer Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Bogotá, Agosto de 1991.

Gómez G., "Programa de Computador para Calcular Asentamientos en Medios Elásticos debidos a Sobrecargas Superficiales", Anexo 4 al Informe de la Investigación "Interacción Estática Suelo-Estructura de Cimentaciones Superficiales", Universidad del Valle, 1989.

Villafañe G., Gómez G. y García J. J., "Interacción Estática Suelo-Estructura de Cimientos Superficiales", Informe Final de Investigación, Universidad del Valle, 1989.

Williams C. E., "Evaluated Behaviour of Foundations on Stiff Clays", Proceedings of Measured Performance of Shallow Foundations, ASCE, Nashville, Tennessee, 1988.

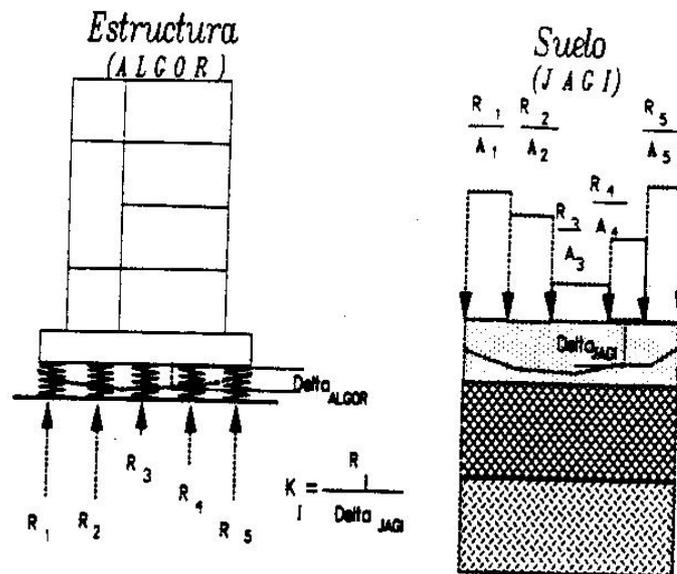


Figura 1. Esquema del procedimiento iterativo propuesto para el análisis de interacción suelo estructura.

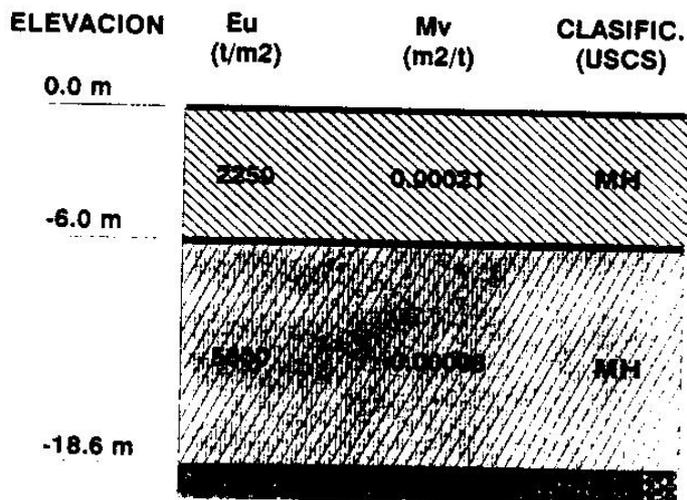


Figura 2. Caso 1. Modelo del subsuelo.

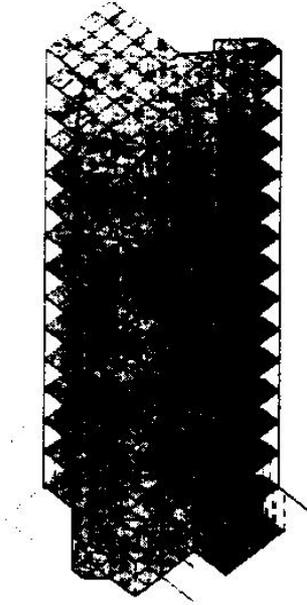


Figura 3. Caso 1. Vista isométrica del modelo de la estructura.

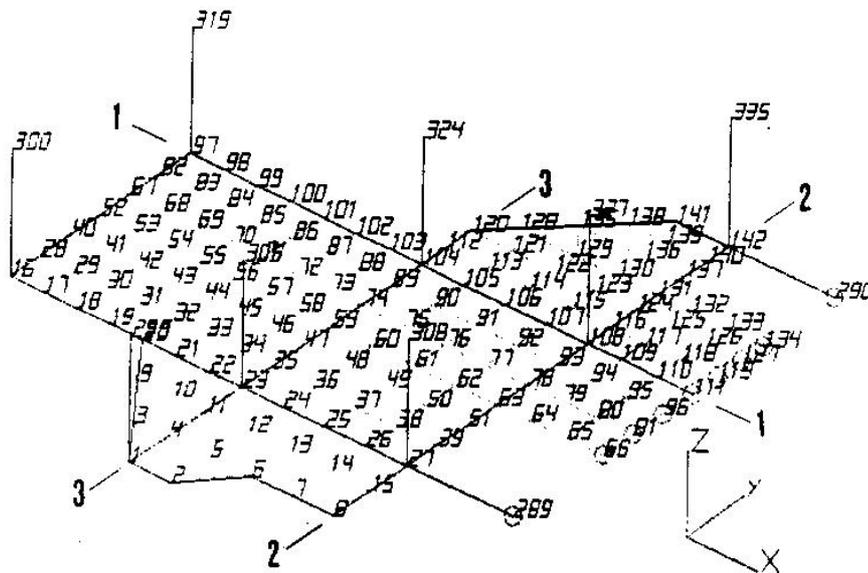


Figura 4. Caso 1. Elementos del modelo de la cimentación.

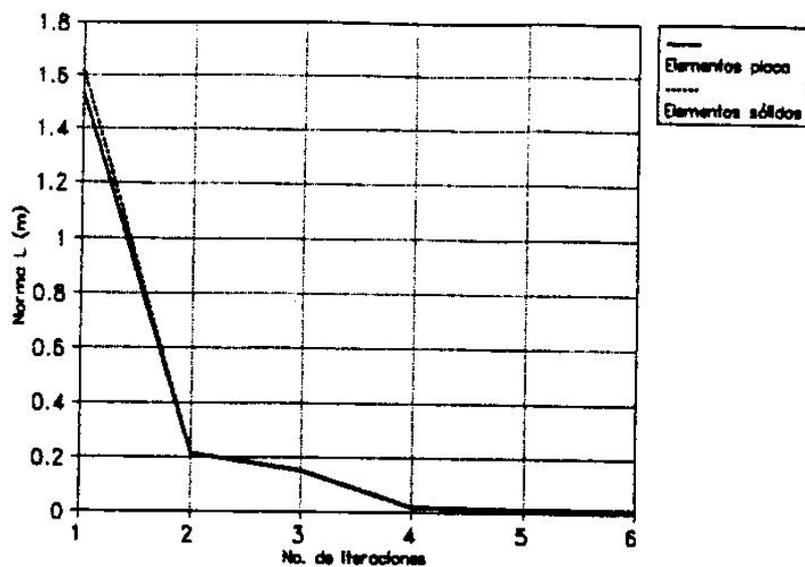


Figura 5. Caso 1. Curva de convergencia de las iteraciones.

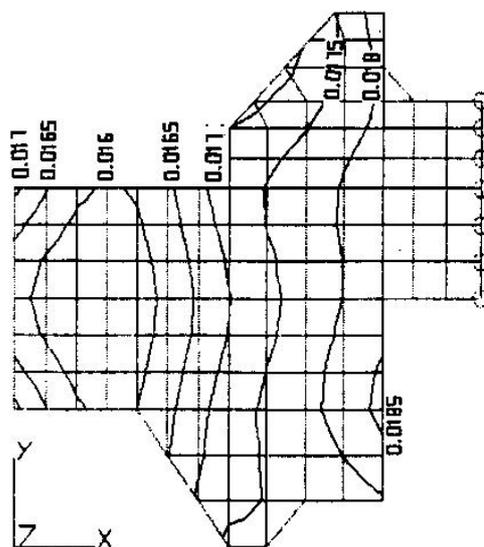


Figura 6. Caso 1. Contornos de hundimientos (m) inmediatos de la cimentación (última iteración) para el 82 % de la carga bruta de servicio.

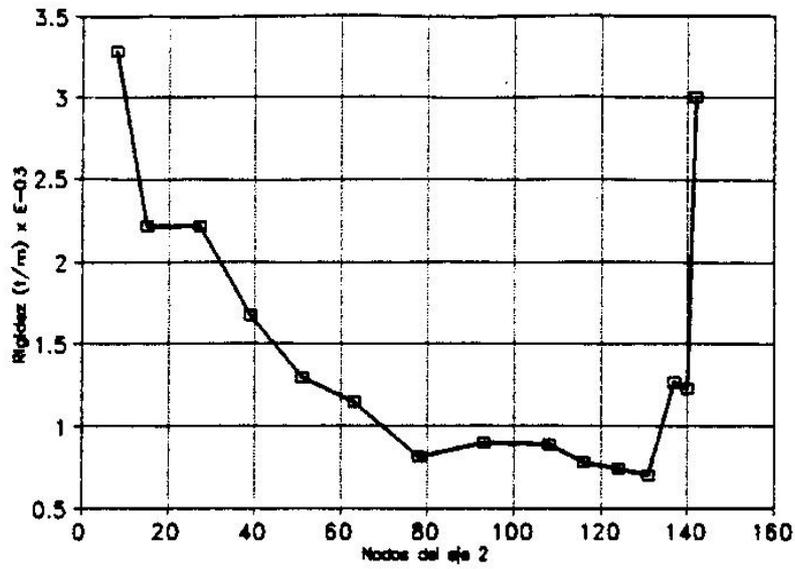


Figura 7. Caso 1. Rigidez de los resortes del eje 2 (última iteración).

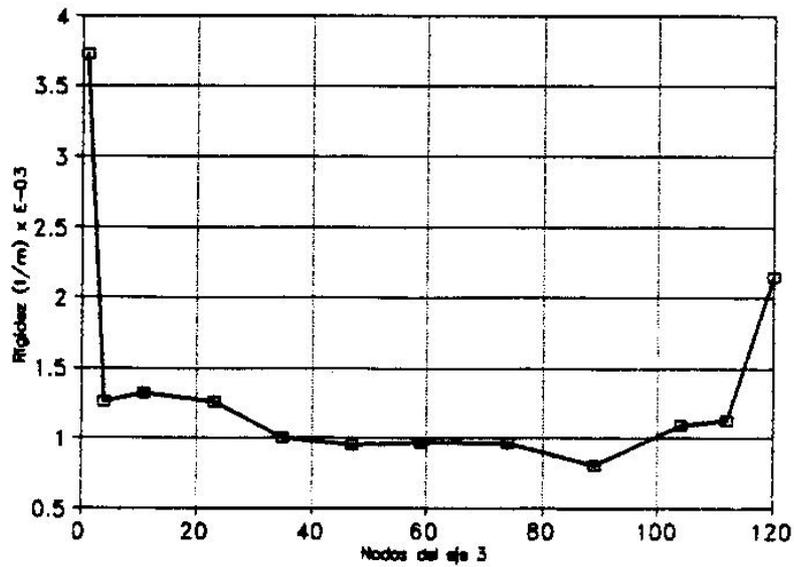


Figura 8. Caso 1. Rigidez de los resortes del eje 3 (última iteración).

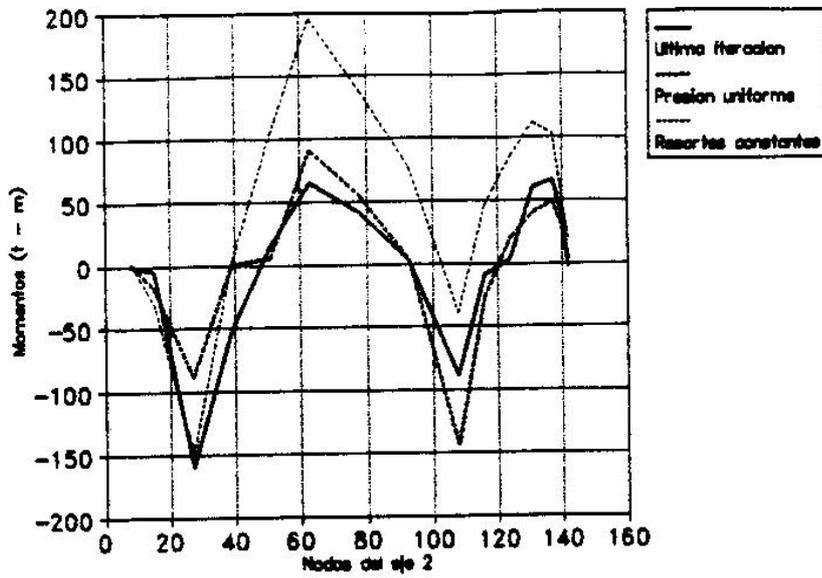


Figura 9. Caso 1. Momentos en la viga del eje 2.

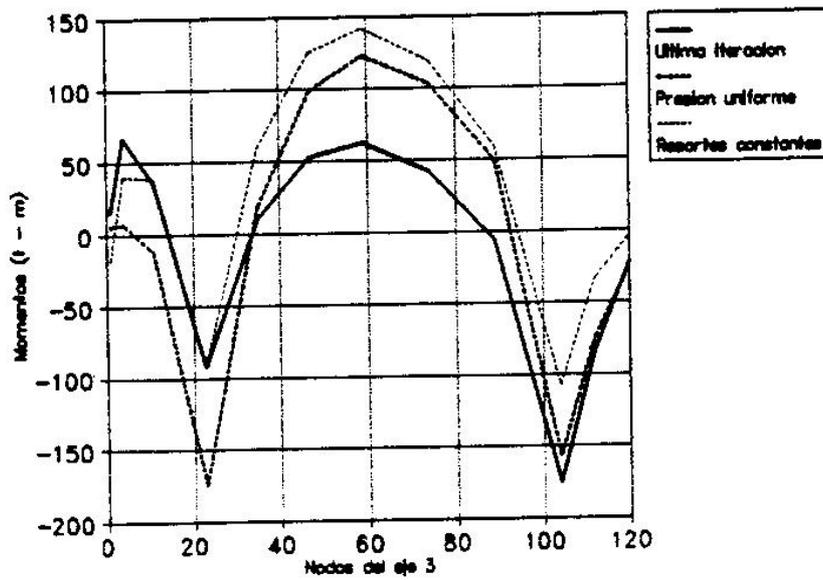


Figura 10. Caso 1. Momentos en la viga del eje 3.

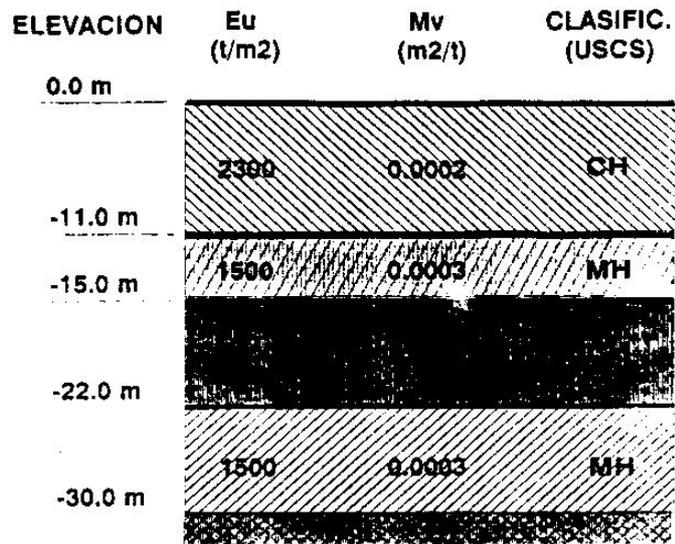


Figura 11. Caso 2. Modelo del subsuelo.

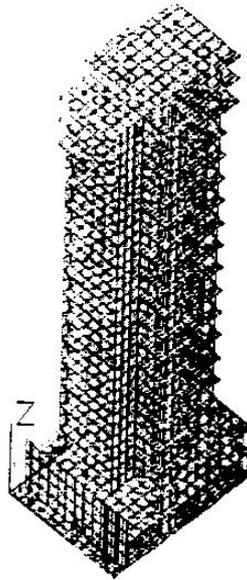


Figura 12. Caso 2. Vista isométrica del modelo de la estructura.

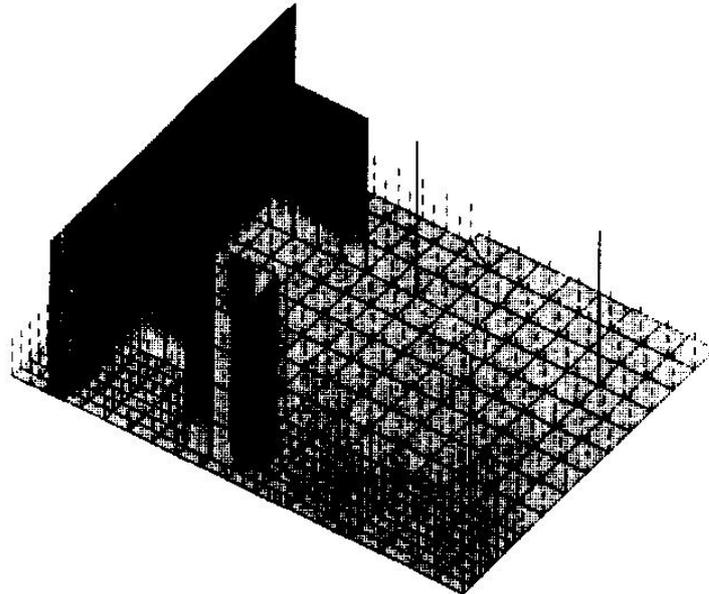


Figura 13. Caso 2. Vista isométrica del modelo de la cimentación.

	281	282	283	284	285	286	287	288	289	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Figura 14. Caso 2. Elementos del modelo de la cimentación.

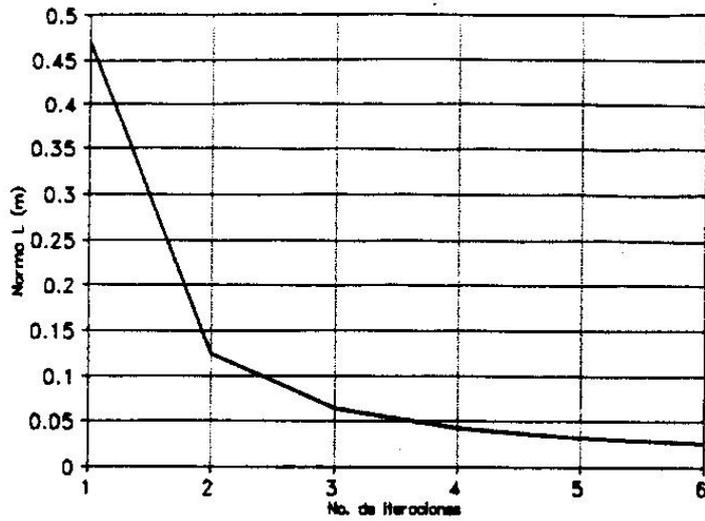


Figura 15. Caso 2. Curva de convergencia de las iteraciones.

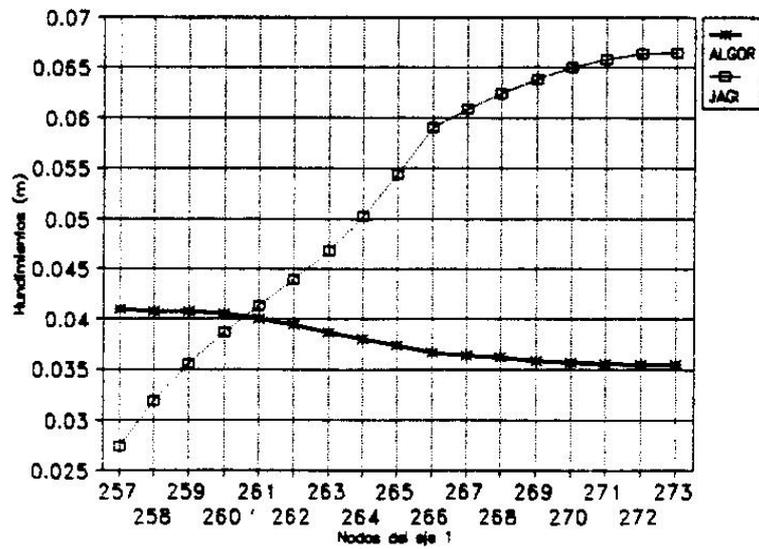


Figura 16. Caso 2. Hundimientos del eje 1 calculados en la primera iteración.

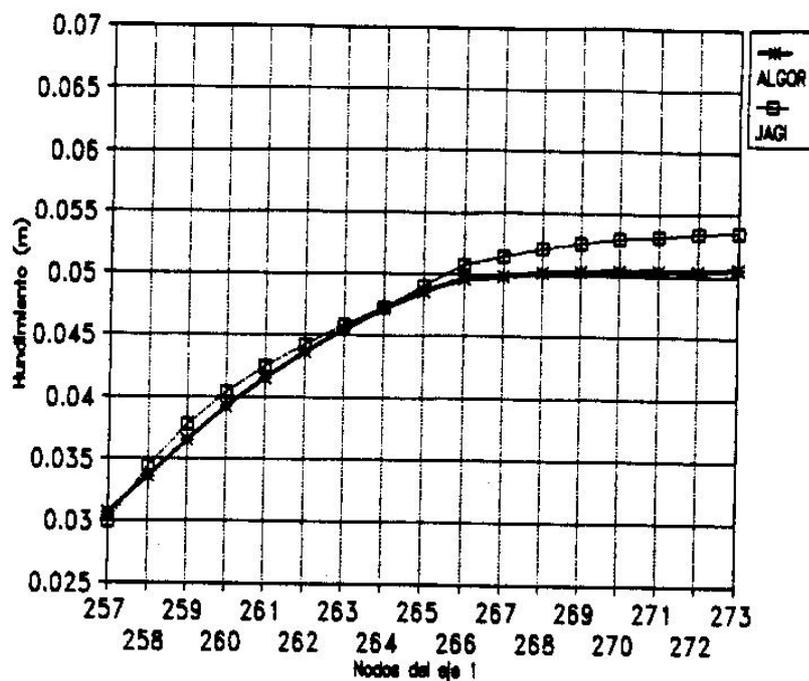


Figura 17. Caso 2. Hundimientos del eje 1 calculados en la sexta iteración.

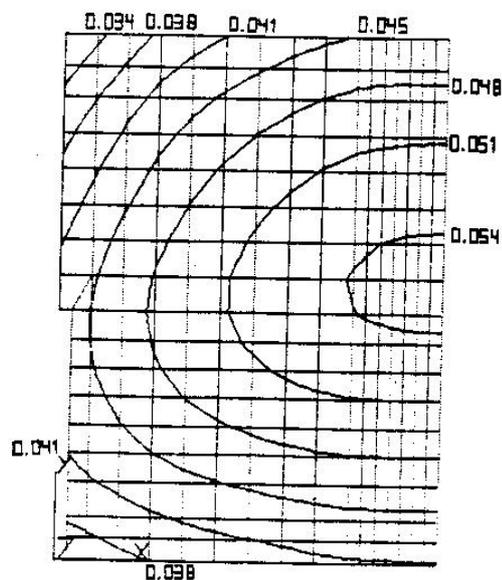


Figura 18. Caso 2. Contornos de hundimientos (m) inmediatos de la cimentación (última iteración) para el 87 % de la carga bruta de servicio.

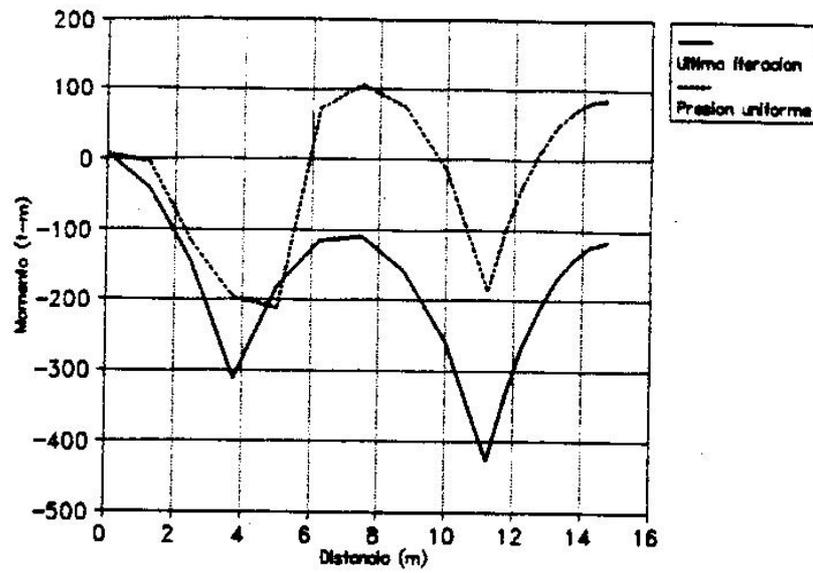


Figura 19. Caso 2. Momentos en la viga del eje 1.

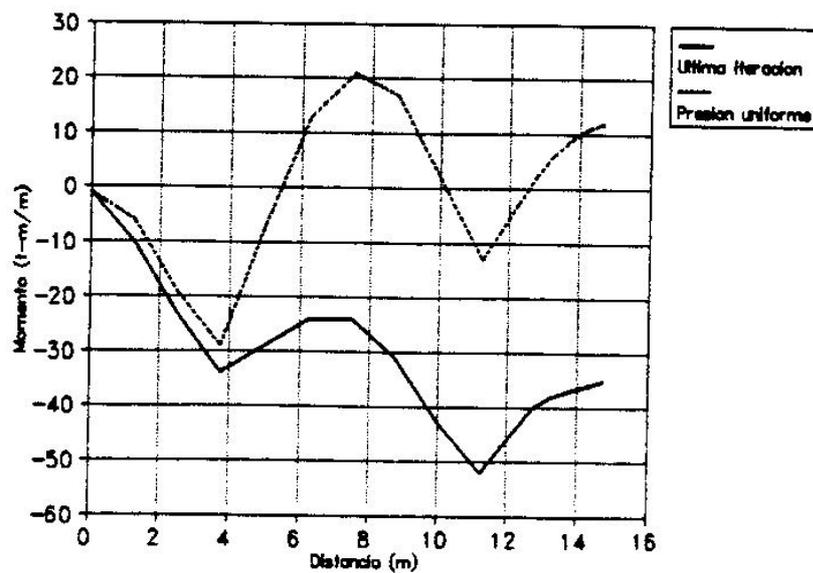


Figura 20. Caso 2. Momentos en la placa del eje 1'.

A N E X O

```

*****
*                                                                 *
*                                                                 *
*   PROGRAMA JAGI PARA CALCULAR ASENTAMIENTOS                   *
*                                                                 *
*                                                                 *
*****
`$R-)  `Range checking off}
`$B+)  `Boolean complete evaluation on}
`$S+)  `Stack checking on}
`$I+)  `I/O checking on}
`$N+)  `Numeric coprocessor}
`$M 65500,16384,655360} `Turbo J default stack and heap}

PROGRAM jagi; {1-Dic-92 modifica limites y simetria}
TYPE
    reg1=RECORD
        r1:ARRAY [0..8] OF SINGLE;
        r2:ARRAY [0..2] OF INTEGER;
    END;

VAR
    elem:ARRAY [0..620] OF reg1;
    i,j,k,l,nno,nel,nes,nsu,tisi,condi,conti:INTEGER;
    m,n:ARRAY [1..4] OF INTEGER;
    xi,yi,xf,yf,xpro,m,x,y,z,x1,y1,x2,y2,x3,y3,z1:SINGLE;
    coin:ARRAY [0..620,0..10] OF SINGLE;
    sue:ARRAY [0..50,0..10,1..2] OF SINGLE;
    archi:TEXT;
    ar,ar0:STRING [1];

PROCEDURE inicializa;
BEGIN
    FILLCHAR (elem,SIZEOF(elem),0);
    FILLCHAR (coin,SIZEOF(coin),0);
    FILLCHAR (sue,SIZEOF(sue),0);
END;

PROCEDURE lee1e;
BEGIN
    ar:=ar0+'ele';
    ASSIGN (archi,ar);
    RESET (archi);
    READ (archi,nel);
    FOR i:=1 TO nel DO
        BEGIN
            FOR j:=1 TO 8 DO READ (archi,elem[i].r1[j]);
            FOR j:=1 TO 2 DO READ (archi,elem[i].r2[j]);
        END;
    CLOSE (archi)
END;

```

```

PROCEDURE leesue;
BEGIN
  ar:=ar0+'.sue';
  ASSIGN (archi,ar);
  RESET (archi);
  READ (archi,nsu);
  FOR i:=1 TO nsu DO
    FOR j:=1 TO 10 DO READ (archi,sue;i,j,1z,sue;i,j,2z);
  CLOSE (archi)
END;

function coef(xi,yi,xf,yf,x0,y0,z0:real):real;
var coe1:real;
function coe0(x,y:real):real;
var u,c,al,uc,uc2,z02,r,r2:real;

begin
  coe0:=0;
  u:=x0-x;c:=y0-y;
  if (c<>0) and (u<>0) then
    begin
      uc:=u*c;uc2:=uc*uc;z02:=z0*z0;
      r2:=z02+u*u+c*c;r:=sqrt(r2);
      al:=arctan(uc/z0/r);
      coe0:=al+z0*uc*(r2+z02)/r/(z02*r2+uc2)
    end
end;

begin
  if z0=0 then begin write (' No funciona para la superficie ');halt end;
  coe1:=coe0(xf,yf)-coe0(-xi,yf)-coe0(xf,-yi)+coe0(-xi,-yi);
  coef:=coe1/2/pi
end;

BEGIN
  inicializa;
  WRITELN (' MAXIMO 620 NUDOS ');WRITELN;
  WRITELN (' Entre nombre de archivos (maximo 8 caracteres) ');
  READLN (ar0);
  lee1e;leesue;
  WRITE (' Entre tipo de simetria 0 (no hay), 1 (x), 2 (y), 3 (x-y) ');
  READLN (tisi);
  CASE tisi OF
    0: condi:=1;
    1,2: condi:=2;
    3: condi:=4;
  END;
  FOR i:=1 TO nel DO
    BEGIN
      xi:=elem;i;.r1;5z;
      yi:=elem;i;.r1;6z;
      FOR j:=1 TO nel DO

```

```

BEGIN
xi:=elem;j2.r1;12;
yi:=elem;j2.r1;22;
xf:=elem;j2.r1;32;
yf:=elem;j2.r1;42;
w:=elem;j2.r1;72;
x3:=elem;j2.r1;52;
y3:=elem;j2.r1;62;
conti:=1;
WHILE conti<=condi DO
BEGIN
CASE conti OF
2: CASE tisi OF
1: BEGIN y3:=-y3;xpro:=yi;yi:=yf;yf:=xpro END;
2,3: BEGIN x3:=-x3;xpro:=xi;xi:=xf;xf:=xpro END;
END;
3: BEGIN y3:=-y3;xpro:=yi;yi:=yf;yf:=xpro END;
4: BEGIN x3:=-x3;xpro:=xi;xi:=xf;xf:=xpro END;
END;
x:=x1-x3;
y:=y1-y3;
FOR l:=1 TO 10 DO IF sue;elem;i2.r2;l2,1,l2<>0 THEN
BEGIN
z:=(sue;elem;i2.r2;l2,1-1,22+sue;elem;i2.r2;l2,1,22)/2;
coin;i,l2:=coin;i,l2+w*coef(xi,yi,xf,yf,x,y,z)
END;
conti:=conti+1;
END
END;
FOR l:=1 TO 10 DO IF sue;elem;i2.r2;l2,1,l2<>0 THEN
BEGIN
z1:=sue;elem;i2.r2;l2,1,22-sue;elem;i2.r2;l2,1-1,22;
coin;i,02:=coin;i,02+coin;i,l2*sue;elem;i2.r2;l2,1,l2*z1
END
END;
WRITE ('ELEM. ', ' ASENTAMIENTOS ');WRITELN;WRITELN;WRITELN;
FOR i:=1 TO nel DO WRITELN (i:4,coin;i,02:16:10);
WRITE (' Entre el nombre para archivo de salida ');
READLN (ar);
ASSIGN (archi,ar);
REWRITE (archi);
WRITE (archi,'ELEM. ', ' ASENTAMIENTOS ');
WRITELN(archi);WRITELN(archi);WRITELN(archi);
FOR i:=1 TO nel DO WRITELN (archi,i:4,coin;i,02:16:10);
CLOSE (archi)
END.

```

SEGUNDO ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS

Santafé de Bogotá, 15 al 17 de Septiembre de 1993

ALGUNAS APLICACIONES DEL ANALISIS
DE INTERACCION ESTATICA SUELO
ESTRUCTURA
DE CIMIENTOS SUPERFICIALES

César Freddy Gil S., IM ¹

José Jaime García A., IM, M.Sc. ²

Germán A. Villafañe R., IC, M.Eng. ³

Introducción

En el diseño de estructuras cimentadas superficialmente generalmente no se tienen en cuenta los hundimientos diferenciales de los cimientos. Esto se debe principalmente a que no existen en el mercado programas comerciales que efectúen el difícil procedimiento de acoplamiento entre las ecuaciones del suelo y de la estructura, proceso que se denomina de interacción estática suelo-estructura. Además, los programas de computador que han sido desarrollados en las universidades para resolver este problema no son fáciles de adquirir, entender y aplicar.

Si los desplazamientos diferenciales causados por hundimientos en los cimientos son grandes se generan fuerzas internas considerables que deberían tenerse en cuenta durante el diseño. De otro lado, la rigidez de los cimientos y de la superestructura ocasiona una redistribución de las presiones sobre el suelo, la cual modifica a su vez la distribución de los hundimientos y las fuerzas en los cimientos y en la superestructura.

¹ *Candidato al título de especialista en estructuras, U. del Valle.*

² *Profesor de estructuras, Universidad del Valle.*

³ *Profesor de geotecnia, Universidad del Valle.*