

CRITERIOS DE DISEÑO PARA LOSAS DE CIMENTACIÓN Y MUROS ESTRUCTURALES ⁽¹⁾

Janeth Rúa Nassar. I.C., E.E. ⁽²⁾

Luis Garza Vásquez. I.C., M.I. ⁽³⁾

Juan Diego Rodríguez M. I.C., E.E. ⁽⁴⁾

OBJETIVO

Estas memorias tienen por objeto mostrar de forma cualitativa como puede comportarse un edificio de altura considerable cuyo sistema estructural son muros, sobre una losa de cimentación, teniendo en cuenta la interacción entre el suelo, el tipo de cimentación y la estructura.

Se pretende mostrar por medio de un ejemplo sencillo como funciona un edificio de muros cimentado en una losa, utilizando las propiedades de los suelos características de suelos duros, intermedios y blandos.

INTRODUCCION

Los sistemas con muros estructurales han sido ampliamente utilizados desde hace varias décadas como sistema estructural altamente eficiente para control de daño estructural y no estructural en edificios de mediana y gran altura sometidos a sismos moderados y severos.

La mayor dificultad en el estudio de los sistemas de muros es la cimentación. Se sabe que los momentos debidos a fuerzas sísmicas inducidos por los muros a la cimentación son de gran magnitud, por lo que el diseño de la misma se convierte en un punto crítico de análisis de este tipo de sistemas. Por otra parte, se acostumbra siempre asumir los muros como empotrados en la base, situación que no es posible lograr con cualquier tipo de cimentación que se tenga en la realidad.

Los momentos y las fuerzas cortantes transmitidas por la superestructura a la estructura de cimentación pueden afectarse fuertemente al considerar dentro del análisis la acción del suelo, comparados con los esfuerzos obtenidos considerando la estructura como empotrada.

1. III Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería, Septiembre 4,5 y 6 de 2003.
2. Ingeniera Civil- Especialista en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Consultora Independiente, presidente Asociación de Ingenieros Estructurales.
3. Ingeniero Civil y Maestro en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Profesor del Posgrado de Estructuras de la Universidad Nacional, Sede Medellín, Gerente de Industrias del Hierro Ltda..
4. Ingeniero Civil-Especialista en Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Consultor Independiente.

CONSIDERACIONES DE LA ESTRUCTURA Y SUELO

En estas memorias se considerará un edificio simple de muros cimentado en una losa interactuando en suelos con diferentes módulos de compresibilidad volumétricos (m_v) así

Aluvión: $m_v = 0.001 \text{cm}^2/\text{Kgf}$

Residuales: $m_v = 0.01 \text{cm}^2/\text{Kgf}$

Arcillas $m_v = 0.1 \text{cm}^2/\text{Kgf}$

En adelante se llamará suelo duro al que posee un $m_v = 0.001 \text{cm}^2/\text{Kgf}$, suelo intermedio con $m_v = 0.01 \text{cm}^2/\text{Kgf}$ y suelo blando al que tiene un $m_v = 0.1 \text{cm}^2/\text{Kgf}$.

Se utilizarán también losas de cimentación macizas con diferentes espesores para combinarlas con los diferentes tipos de suelos y observar el comportamiento de los diferentes elementos del edificio del ejercicio.

La losa de 1.00m de espesor se llamará muy rígida, la de 0.70m rígida y la de 0.40m, flexible.

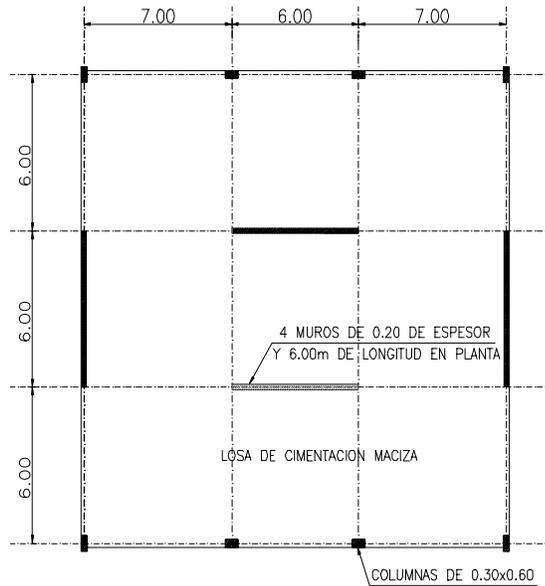


FIGURA 1. Planta del Edificio

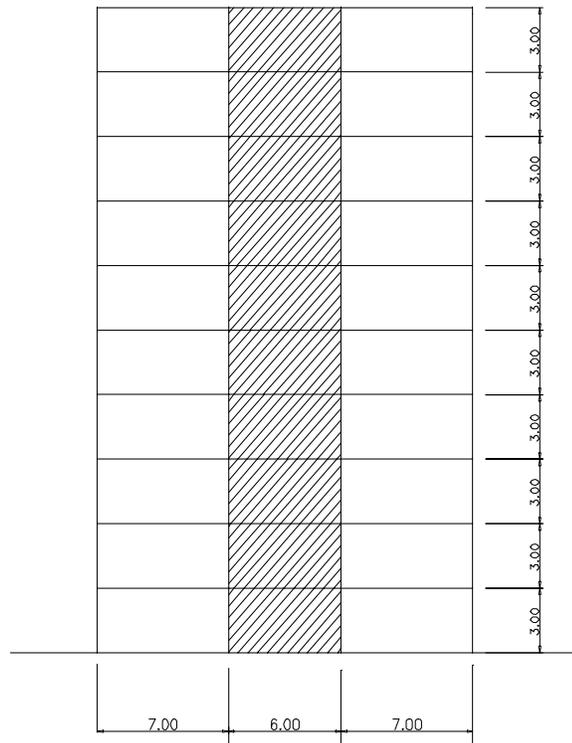


FIGURA 2. Elevación general del edificio

Para desarrollar este ejercicio académico se creó un edificio simétrico de 10 pisos de geometría sencilla, columnas de 0.30x0.60, losa aligerada de 35cm y cuatro muros de 20cm de espesor y 6.00m de longitud como se muestra en las figuras 1 y 2.

Por simplicidad en el ejercicio se modeló la losa de cimentación como maciza simulada con unos elementos shell del SAP90, y para observar algunos comportamientos típicos se varió el suelo, usando diferentes módulos de compresibilidad volumétrica (como se mencionó antes) y el espesor de la losa de cimentación, es decir, la rigidez de la misma.

Para el ejemplo se utilizó únicamente una combinación de carga vertical sin mayorar más el sismo en una sola dirección utilizando el método de la fuerza horizontal equivalente. Esto, con el fin de simplificar el ejercicio utilizando un programa de interacción suelo estructura para losas de cimentación, que tiene en cuenta la acción de la superestructura y utiliza el siguiente procedimiento:

INTERACCION SUELO ESTRUCTURA

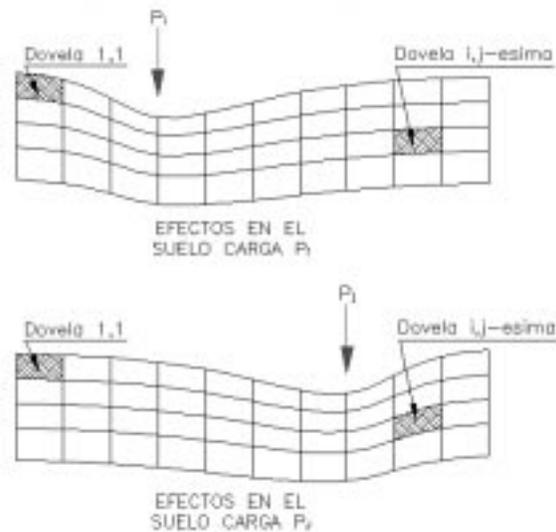


FIGURA 4. Interacción Suelo Estructura

La resistencia del suelo y su rigidez varia dependiendo de los esfuerzos de confinamiento. La carga P_i genera esfuerzos de confinamiento en cada una de las dovelas vecinas. Igualmente la carga P_j genera este mismo efecto. De esta manera se genera una matriz de rigidez cúbica llamada matriz EMA^{(1),(6)}, que representa las deformaciones en cada una de las dovelas al aplicar cargas unitarias en las superficie. Estas deformaciones pueden igualarse por medio de resortes con una rigidez equivalente.

suelo, cuando esto sucede, redistribuyendo a las dovelas vecinas el excedente.

FUNCIONAMIENTO ISE 94

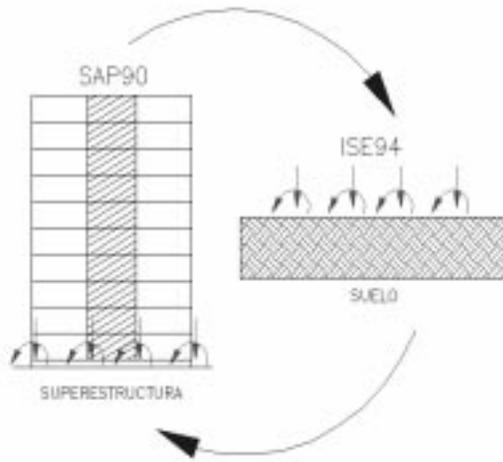
El programa ISE 94 desarrollado por los ingenieros Francisco Hoyos y Winston Echavarría⁽⁴⁾, modela los efectos de la interacción Suelo Estructura.

Las características principales del ISE 94 son:

- La superestructura se modela de la misma manera que en SAP90.
- La losa de cimentación se modela con elementos tipo SHELL utilizando una discretización aceptable.
- Se define el número de estratos, el espesor y módulo de compresibilidad volumétrico. El programa se encarga de dividir estos estratos en subestratos de similar dimensión a las dovelas.
- Por último se le asigna al suelo la capacidad última. El programa se auto controla cuando esta capacidad última es excedida redistribuyendo a las dovelas vecinas el excedente.
- El programa controla que no se presente tracción en el

Este programa interactúa con el programa SAP 90 así:

- Inicialmente hace un análisis de la estructura con unos resortes supuestos a la cimentación
- Las reacciones obtenidas del primer análisis son llevadas al ISE modelando los efectos del suelo en una primera iteración.
- El programa ISE regresa al SAP 90 unos valores equivalentes de unas constantes de resorte para realizar un segundo análisis.
- Nuevamente extrae las reacciones de la superestructura y las lleva al ISE para realizar una segunda iteración.
- Este proceso se repite hasta que las constantes de resorte converjan.



altura del piso), desplazamiento horizontal total, momentos en los muros, momentos en las columnas, asentamientos y momentos en la losa de cimentación.

Figura 3. Funcionamiento del ISE

ALGUNOS RESULTADOS DE IMPORTANCIA

Después de hacer el análisis de nueve casos combinando los diferentes tipos de suelo con las distintas rigideces de losa y comparándola con el caso empotrado, se encontraron algunos resultados de importancia desde el punto de vista de la deriva (controlando con el 1% de la

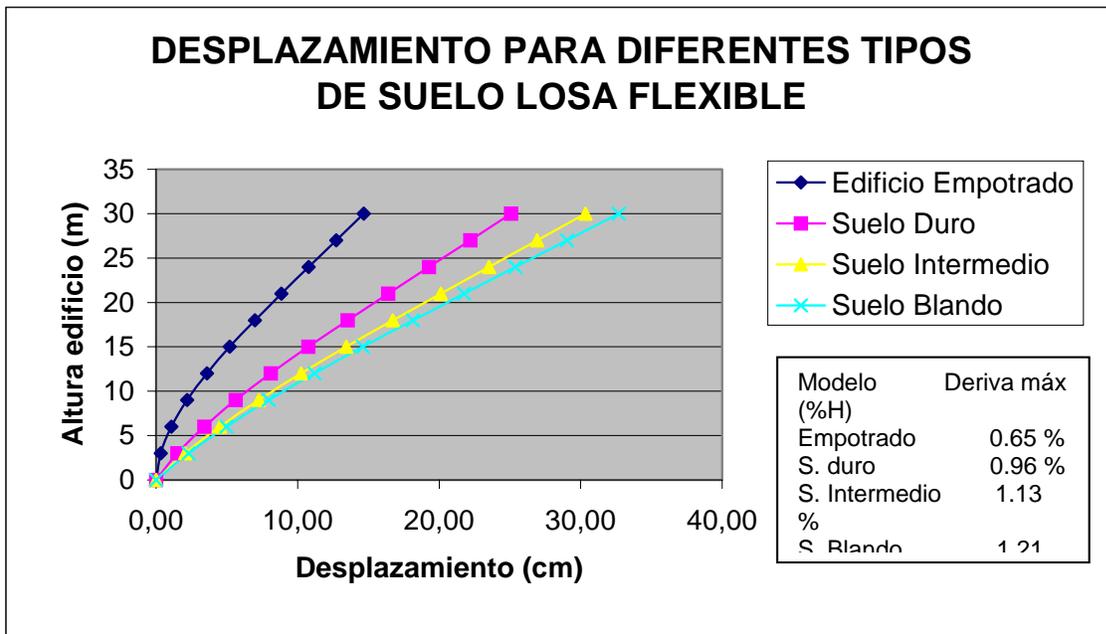


GRAFICO 1. Desplazamientos para losas de espesor $e=0.40$ (Flexible)

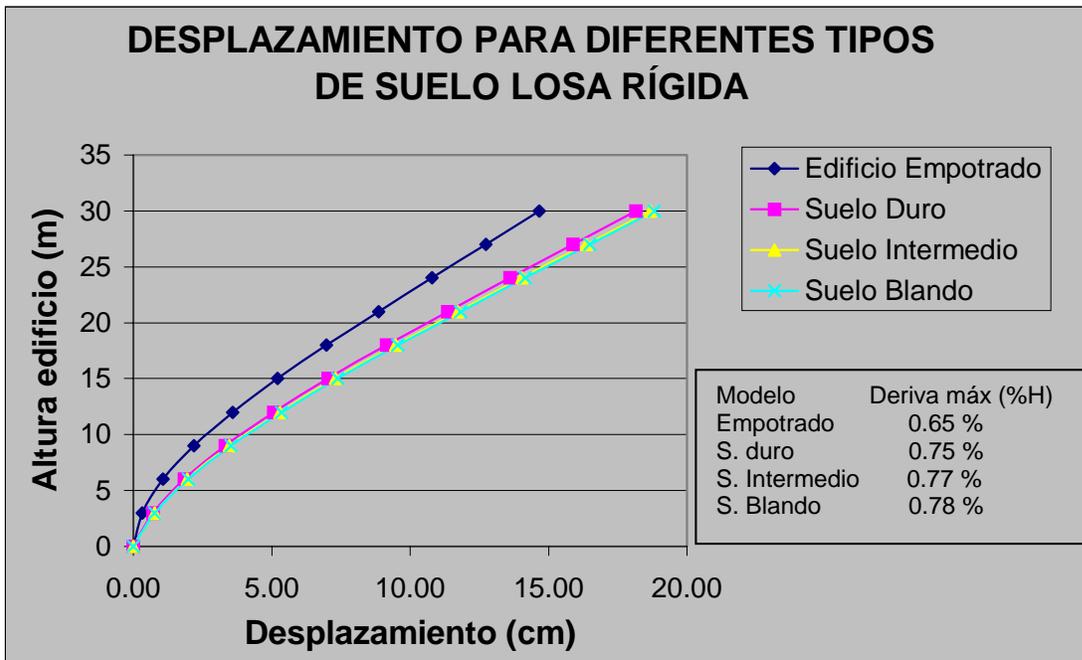


GRAFICO 2. Desplazamiento para losa de espesor $e=0.70$ (Rígida)

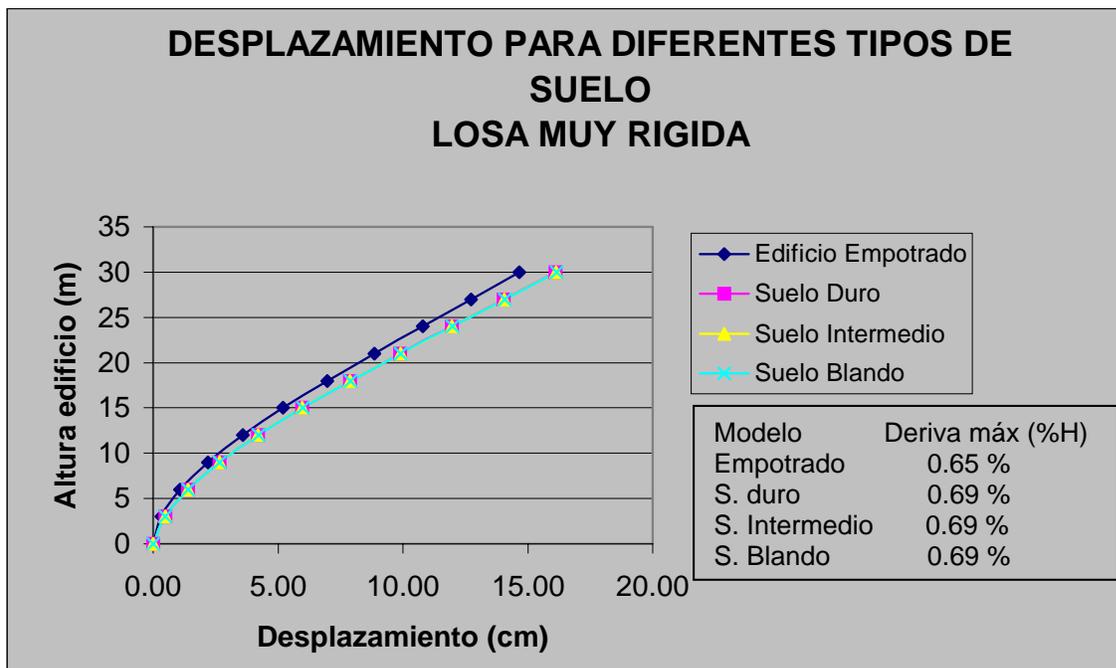


GRAFICO 3. Desplazamiento para losa de espesor $e=1.00$ (Muy Rígida)

En los gráficos No 1, 2 y 3 observamos como a pesar de la diferencia de suelos, la rigidez de la losa juega un

papel importante en el control de la deriva, pareciendo más cercano al

comportamiento empotrado, los modelos con losas de mayor rigidez.

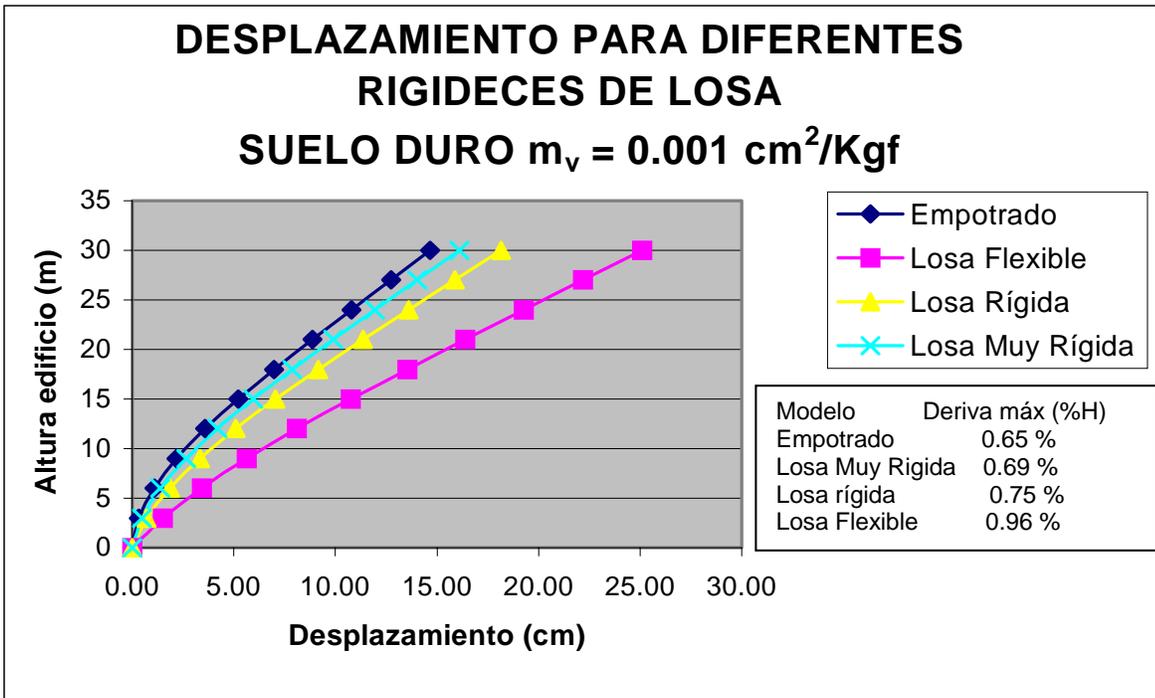


GRAFICO 4. Desplazamiento para suelo duro

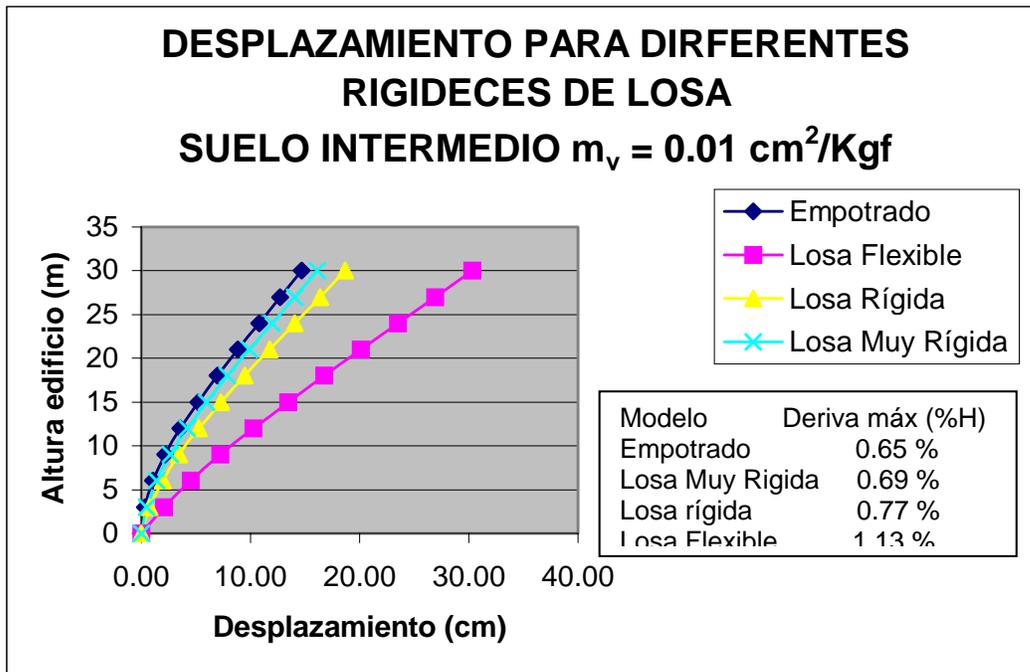


GRAFICO 5. Desplazamientos para suelo intermedio

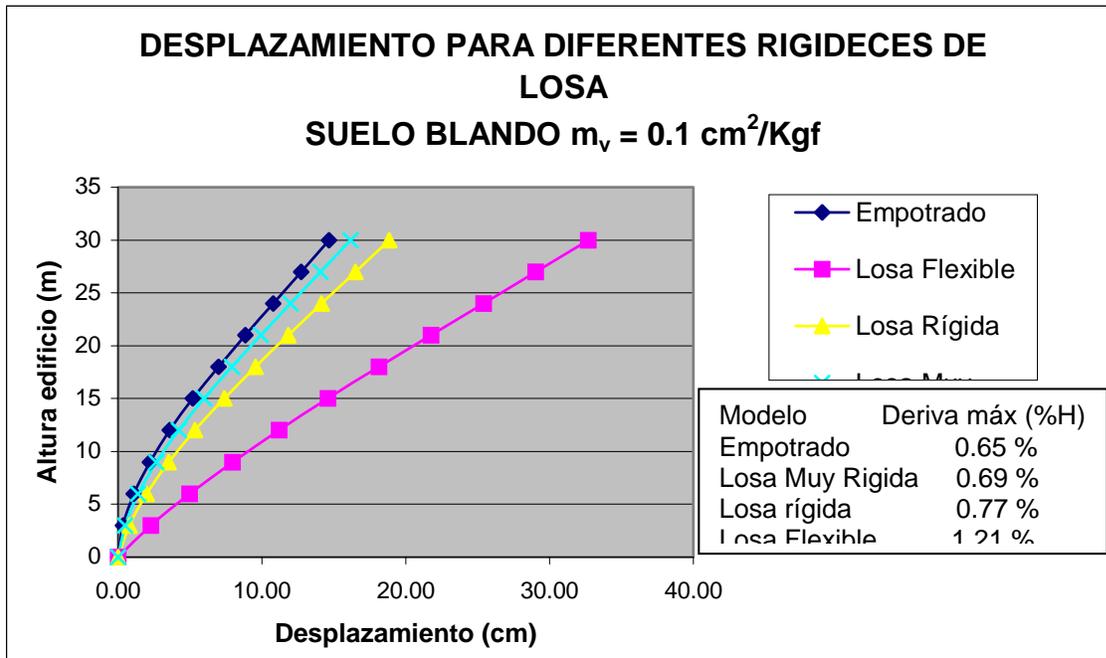


GRAFICO 6. Desplazamiento para suelo blando

De los gráficos No 4, 5 y 6 en los casos sobre suelo intermedio y blando, la deriva sobrepasa el límite del 1% de la altura del piso. Lo que quiere decir que si se obvia la interacción suelo estructura puede pensarse que el diseño esta cumpliendo con la deriva permitida, cuando en realidad puede estar sobrepasándola.

Cabe anotar que en el caso del suelo más blando los asentamientos para carga vertical son del orden de 55cm, por lo que este no es un caso real pero se muestra como caso extremo.

Cuando se tiene en cuenta la interacción del suelo con la estructura

de cimentación y la superestructura, para este ejercicio, se obtienen momentos del orden de 2000 ton-m, mientras que si se considera el edificio empotrado el valor del momento en la base del muro puede duplicarse resultando en un diseño equivocado

Esto se debe a que considerando la cimentación y la estructura interactuando con el suelo, la losa distribuirá parte del momento tomado por los muros entre la losa y las columnas del resto del edificio. Esto se puede ver en la Figura No 5, donde se observa como se redistribuyen los momentos de la superestructura en diferentes proporciones de acuerdo a la rigidez de la losa y el tipo del suelo,

donde claramente la losa más rígida (210 ton-m) toma mayor momento que la losa flexible (144 ton.m).

En los gráficos 7, 8 y 9 se pueden observar las reacciones en el suelo. En el modelo empotrado (gráfico7) se presentaron incluso tensiones en el eje del muro, presiones nulas en un eje

	Suelo Duro	Suelo Intermedio	Suelo Blando
Empotrado	5.290	5.290	5.290
Losa flexible	1.923	1.935	2.164
Losa rígida	2.054	2.160	2.270
Losa muy rígida	2.203	2.251	2.290

Tabla 1. Momentos Sísmicos en ton-m en la base de los muros

intermedio y las presiones debidas a carga vertical en el eje de columnas.

Como se aprecia en el gráfico 8, la losa muy rígida tiende a uniformizar los esfuerzos bajo ella, y una losa flexible (grafico 9) siguiente no toma tracción y los esfuerzos son más concentrados.



FIGURA 5. Momentos en la losa [kN-m]

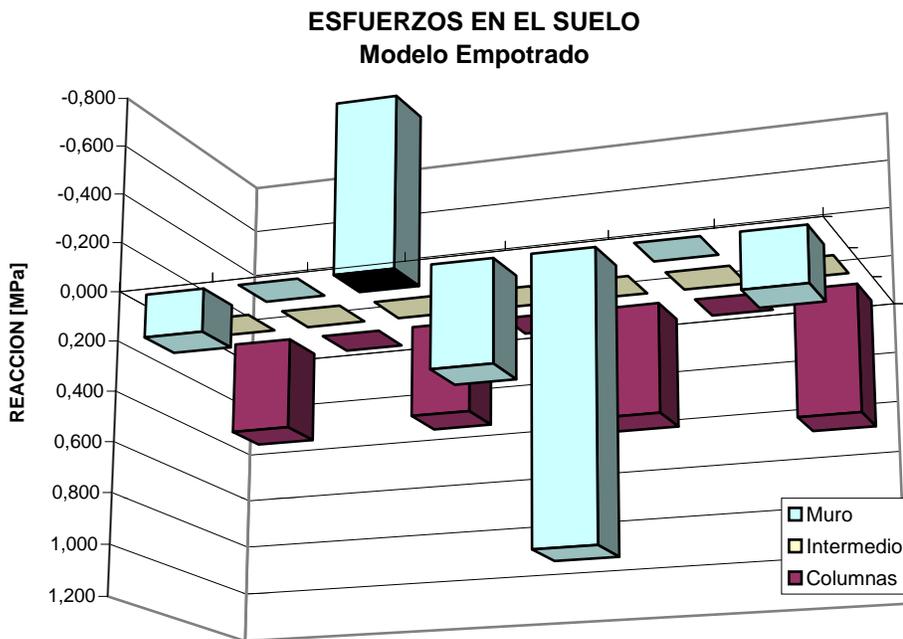


GRAFICO 7. Esfuerzo en el Suelo (Modelo Empotrado)

ESFUERZOS EN EL SUELO
Losa Muy Rígida Sobre Suelo Duro

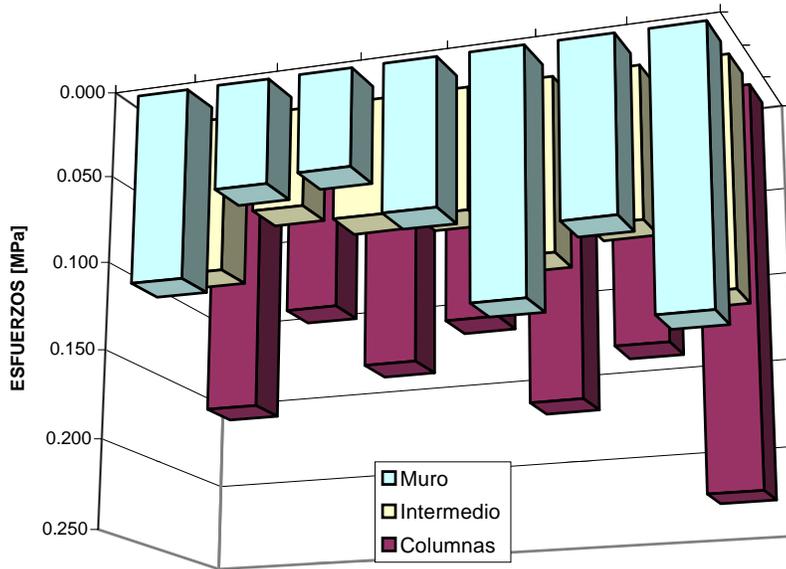


GRAFICO 8. Esfuerzo en el Suelo (Losa muy Rígida Suelo Duro)

ESFUERZOS EN EL SUELO
Losa Flexible Sobre Suelo Intermedio

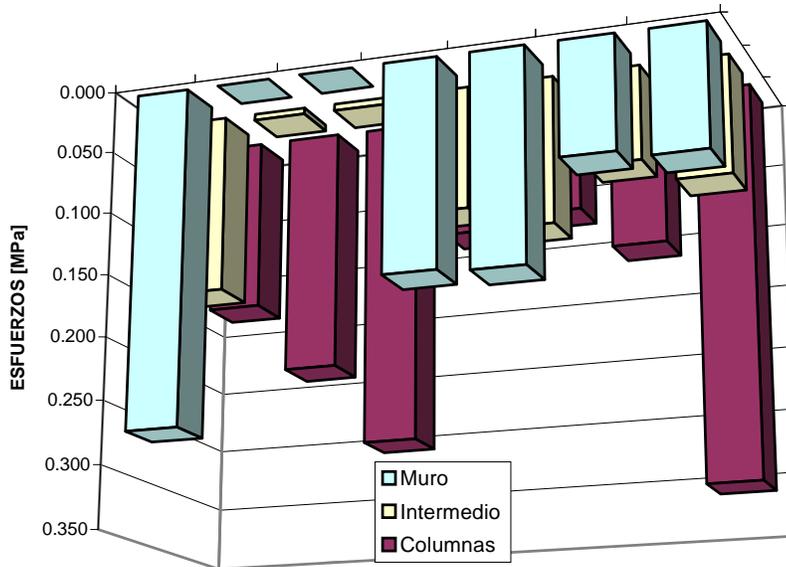


GRAFICO 9 Esfuerzo en el Suelo (Losa Flexible Suelo Intermedio)

En la Figura No 6 se muestran los momentos en una columna en dos casos extremos comparados con el caso empotrado. Pueden verse que si

no se considera el efecto de la losa interactuando con la estructura y el suelo, las columnas podrían quedar

diseñadas para un momento menor al que estarían sometidas en la realidad.

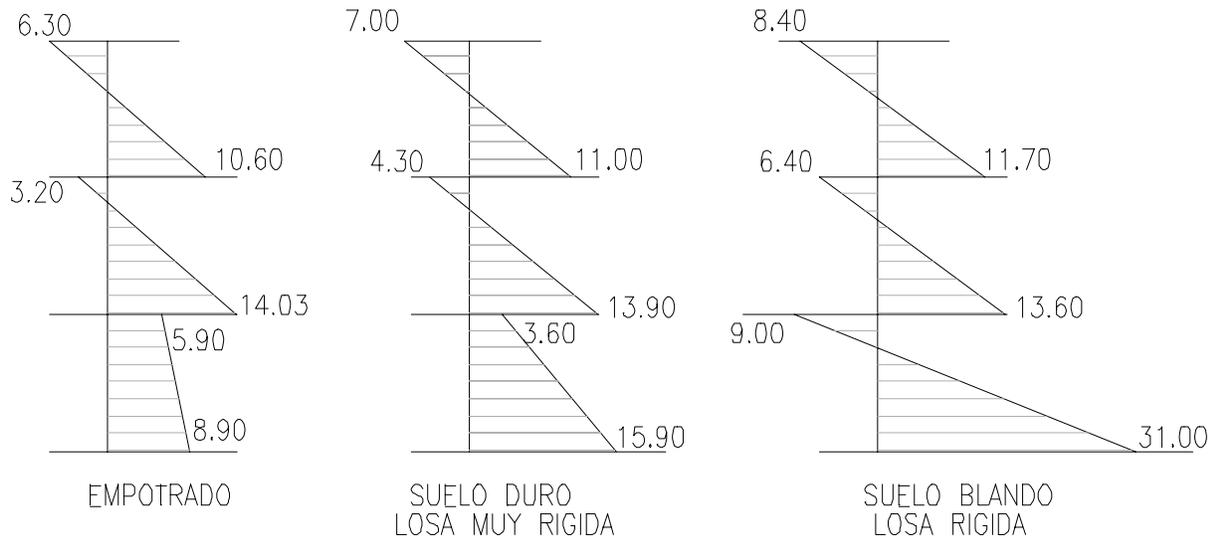


FIGURA 6. Momentos en las columnas para algunos casos en los tres primeros pisos.

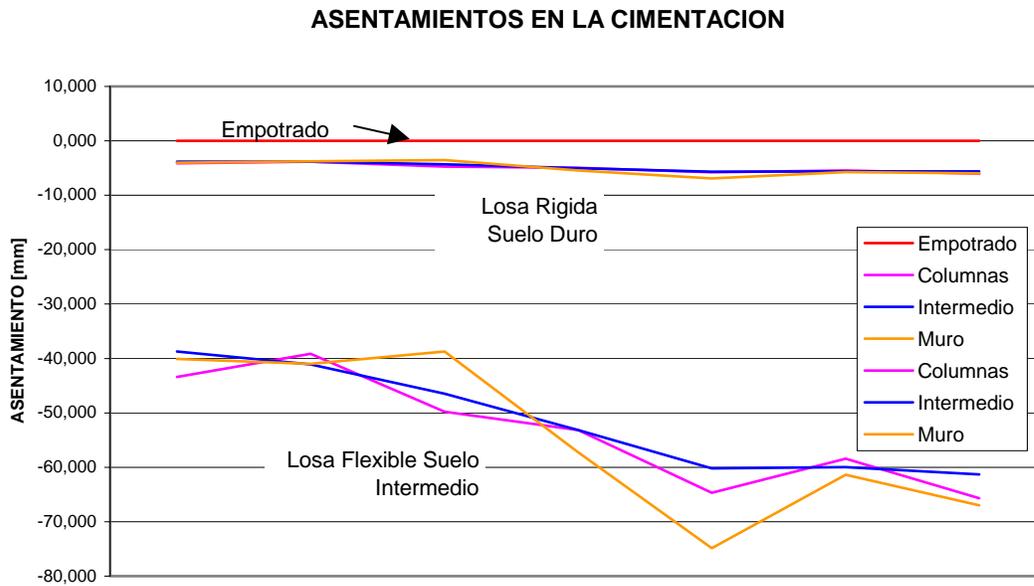


GRAFICO 10. Asentamientos en la losa de cimentación

Los asentamientos en la cimentación se comparan en el Gráfico No 10. En

éste se observa como se controlan los asentamientos diferenciales de la losa

muy rígida sobre el suelo duro, mientras que la losa flexible presenta un asentamiento diferencial de $L/200$ entre las dos esquinas del muro, asentamiento que no es aceptable. Adicionalmente se observa la tendencia del edificio a rotar como unidad. Esto explica el incremento en las derivas.

COMPARACIÓN DE ISE 94 Y MODULO SUBRASANTE.

Como proceso alternativo se comparó también el modelo para la simplificación usual de módulo de reacción de la subrasante de Winkler constante, que está disponible también en los programas de cálculo comerciales.

Este módulo se obtuvo dividiendo el peso del edificio entre el asentamiento promedio que se obtuvo de la Interacción Suelo Estructura para el caso de cimentación rígida y suelo intermedio.

$$K = \frac{35951.2kN}{20m \times 18m \times 0.055m} = 1816kN / m^3$$

En la práctica este módulo se puede obtener si se dispone de estimaciones confiables del asentamiento total.

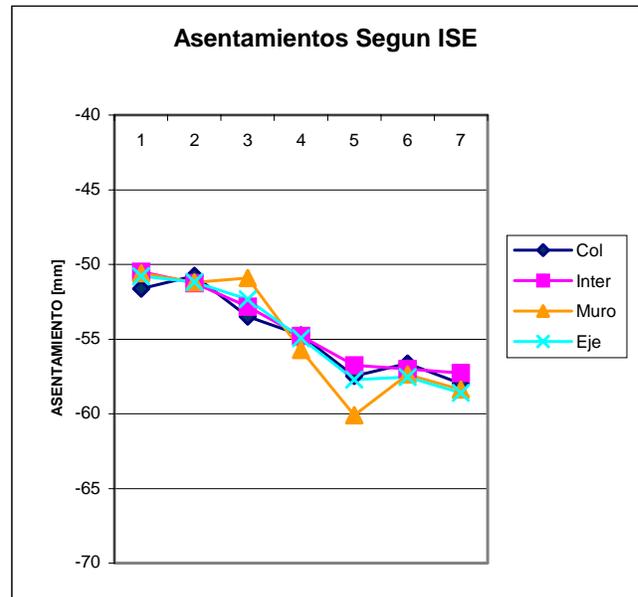
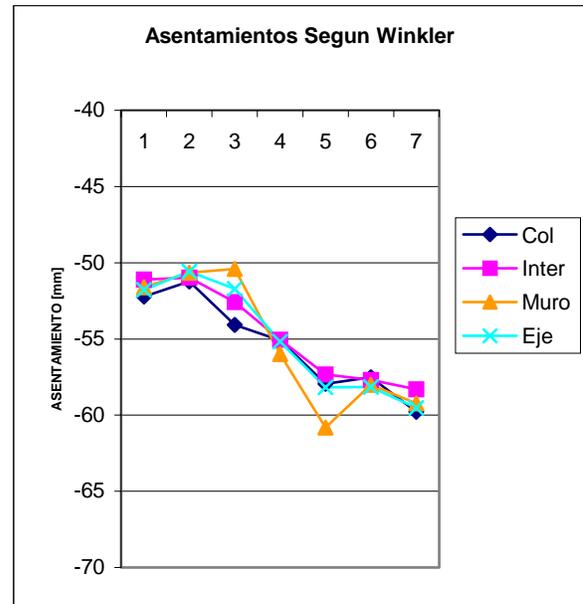


Grafico. 11 Asentamiento según ISE y Winkler

En las gráficas 11 y 12 se puede observar que tanto los asentamientos

como las derivas con ambos métodos son similares, y en todo caso, como se observó antes, muy distintos a las del modelo empotrado.

En la tabla 2 y figura 7 se observa también que las diferencias son mínimas entre los dos métodos, para los momentos en los muros y las columnas.

En la figura 8 se puede apreciar, sin embargo, que existen diferencias en los momentos en la losa

		Suelo intermedio
Empotrado		5,290
Losa Flexible		1,935
Losa Rígida	ISE	2,160
	Winkler	2,201
Losa muy rígida		2,251

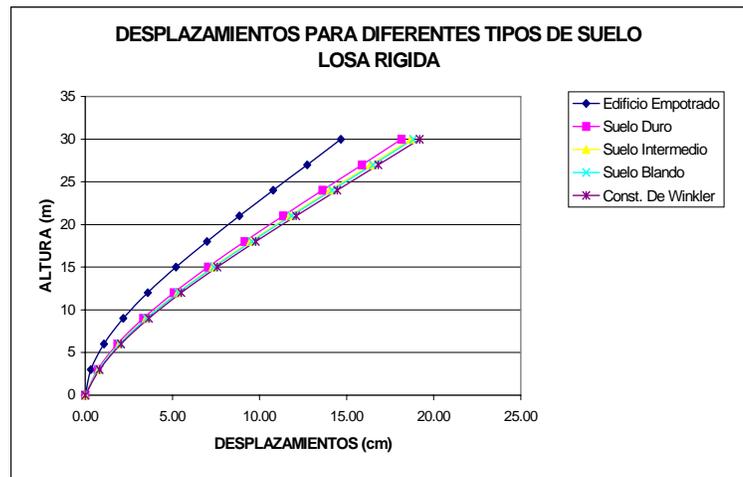
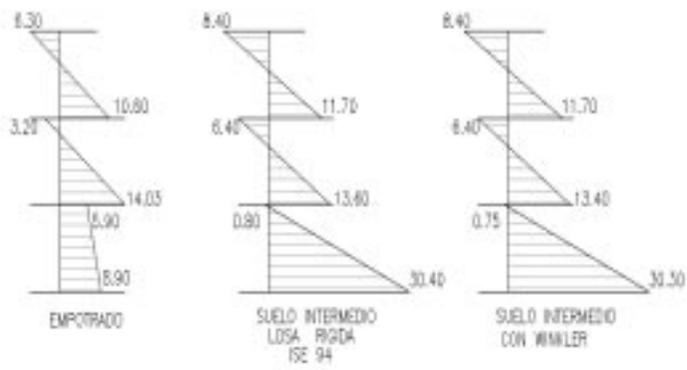


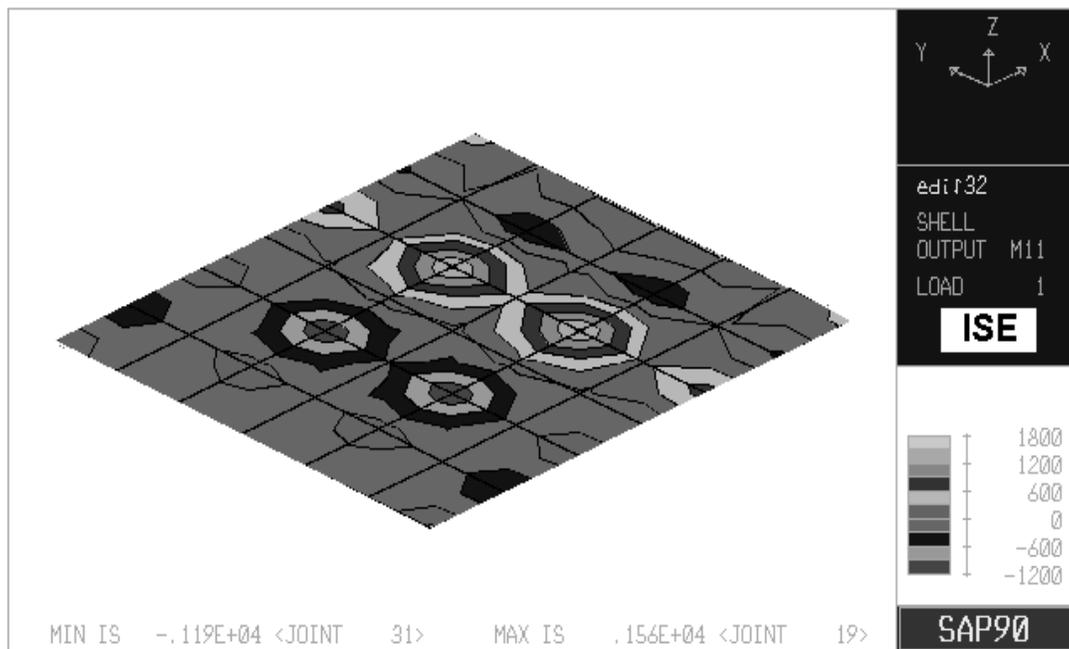
Gráfico 12.

Tabla 2. Momentos sísmicos en ton-m en la base de los muros para ISE y Winkler



DIAGRAMAS DE MOMENTO EN COLUMNAS

Figura 7



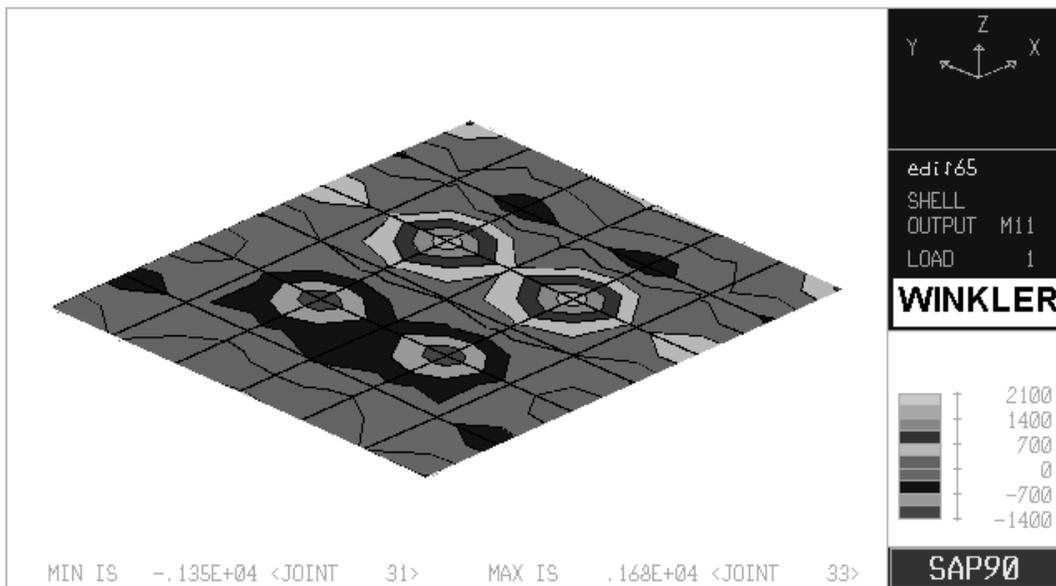


Figura 8. Momento en Losa para ISE y Winkler en suelo intermedio y losa rígida

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los análisis cualitativos anteriores y la práctica de cimentaciones más aceptada, se pueden establecer las siguientes;

-Las losas son una alternativa adecuada de cimentación en suelos de compresibilidad media a alta. Debido a su rigidez normalmente importante como se recomienda en las anteriores conclusiones parciales, se pueden tolerar asentamientos totales grandes siempre y cuando se controlen los asentamientos diferenciales. Se pueden incluso controlar los

asentamientos por medio de compensaciones totales ó parciales.

- Sin embargo, para suelos de estratigrafías no paralelas ó laderas con estratigrafías inclinadas puede ser inconveniente su uso por el riesgo de poder presentar volcamientos importantes.

-Por la razón anterior, es muy importante que la resultante de las cargas coincida hasta donde sea posible con el centro de gravedad de la losa.

-Para que el comportamiento del muro sea adecuado como controlador de derivas se requiere que la losa tenga una rigidez considerable.

- Para la obtención de los momentos actuantes en las pantallas y columnas no es adecuado el modelo de

cimentación empotrada. Su variación es considerable y los análisis se deben hacer considerando la interacción suelo-estructura.

-Para el caso mostrado y teniendo en cuenta que se haya realizado por el Ingeniero de Suelos una valoración adecuada de asentamiento esperado, se puede trabajar con el coeficiente de reacción de la subrasante para obtener valores similares a los obtenidos con ISE, aprovechando la disponibilidad de este procedimiento en los programas comerciales.

BIBLIOGRAFÍA

1.- NSR-98, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Asociación de Ingeniería Sísmica, Bogotá, 1998.

2.-MAC GREGOR,J., Reinforced Concrete.,Prentice Hall inc., New Jersey, USA,1988.

3.- BOWLES,J., Foundation Analysis and Design, Mc Graw Hill, Singapore,1998.

4.- ECHAVARRIA W.,HOYOS F., Efecto Tridimensional en el Análisis de ISE. Tesis Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Medellín,1995.

5.- GARZA V.L., Aplicación de Interacción Suelo Estructura Estática, II Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá,1993.

6.- ZEEVAERT L., Interacción Suelo Estructura, Limusa,México,1980.