

ESTUDIO PARAMETRICO DE LOS EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SÍSMICA SUELO ESTRUCTURA.

Manuel R. Villarraga H.¹, Mauricio Pineda A., Andrés F. Ramírez R., Camilo E. Ramírez R., Juan D. Arango R., Ricardo A. Rodríguez A., Jimmy Valencia C.²

¹ Profesor Escuela de Ingeniería Civil – Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia – Medellín.

² Ingenieros Civiles Universidad Nacional de Colombia – Medellín.

RESUMEN: La NSR 98 recomienda analizar los efectos de la interacción sísmica suelo estructura (ISSE) cuando se combinan estructuras con periodos de vibración mayores de 0.7s y perfiles de suelos tipo S4. Estudios realizados por Agatón y García (Referencia 1) y Villarraga y García (Referencia 15) mostraron que se producen modificaciones sustanciales a la respuesta de los edificios de menor altura sobre suelos más rígidos que el S4. Se realizaron dos Trabajos Dirigidos de Grado que ejecutaron análisis paramétricos destinados a identificar las variables que tienen una mayor influencia en la Interacción Sísmica Suelo Estructura, para lo cual se analizaron diferentes condiciones de suelo, trabajando con perfiles de suelos homogéneos y perfiles de suelos que presentan un incremento de la rigidez con la profundidad, y edificios en pórticos y muros de cortante representativos de los sistemas estructurales empleados en la ciudad de Medellín. En total se analizaron mas de 250 casos con el método completo, empleando el programa FLUSH, para lo cual fue necesario desarrollar interfases para la entrada de datos (INPUT FLUSH 2005) y para el procesamiento de los resultados (OUTPUT FLUSH 2005). Como resultado de los análisis se encontró que los fenómenos de interacción mas notorios no necesariamente ocurren en edificios esbeltos sobre suelos blandos, como considera la NSR-98, sino cuando ocurren coincidencias entre el periodo de vibración del primero o algún modo superior de vibración de la estructura y el del suelo.

PALABRAS CLAVES: Interacción Sísmica Suelo-Estructura (ISSE), Periodo natural de vibración, Velocidad de propagación de Onda de Corte, Espectros de respuesta, Cortante basal

1. INTRODUCCIÓN

La NSR-98 (Referencia 2) recomienda que los efectos de la Interacción Sísmica Suelo Estructura deben ser evaluados y considerados en el diseño de estructuras esbeltas sobre suelos blandos, de acuerdo con el artículo A.3.4.2.2 (e):

- Estructuras, regulares o irregulares, localizadas en sitios que tengan un perfil de suelo tipo S₄ y que tengan un periodo mayor de 0.7 segundos. En este caso el análisis debe incluir los efectos de interacción suelo-estructura, tal como lo describe el Capítulo A.7.

Sin embargo, Agatón y García(Referencia 1) y Villarraga y García (Referencia 15), analizando algunos suelos y edificios representativos de la ciudad de Medellín y algunos casos particulares de edificios localizados en la Ciudad de Bogotá, concluyeron que el cálculo de los efectos de ISSE por métodos

simplificados puede llevar a ignorar importantes efectos y que en el caso de edificios de altura moderada, la concordancia entre el período de vibración del suelo y el del edificio, produce aceleraciones espectrales muy fuertes para periodos cortos y en consecuencia aumento en las cortantes basales y fuerzas sísmicas de piso. Esta situación no se detectó mediante los métodos simplificados y sólo fue posible identificarla mediante un análisis empleando el Método Completo. También encontraron que para edificios con períodos largos no se presentan los efectos anteriormente anotados y se puede observar una disminución en la cortante basal, producto del aumento en el período de vibración.

Estos resultados no están de acuerdo con las recomendaciones de la NSR-98, en el sentido que los análisis de ISSE se deben realizar para estructuras altas (Periodo superior a 0.7 seg.) apoyados en suelos tipo S4. Como se pudo observar en el caso de suelos

relativamente rígidos, clasificados como S2 o S3, los efectos de la ISSE también pueden llegar a ser notorios.

Considerando estos resultados, se propuso la ejecución de un estudio paramétrico destinado a identificar las variables que tienen un mayor efecto en los resultados de la Interacción Sísmica Suelo Estructura, para lo cual se analizaron las siguientes variables en los perfiles de suelo:

- Rigidez del suelo, se consideraron suelos homogéneos y suelos cuya rigidez varía con la profundidad.
- Espesor del perfil de suelo.
- Impedancia con la roca sobre la cual está apoyado el perfil de suelo.

En cuanto a las estructuras se consideraron edificios representativos de las soluciones estructurales normalmente empleadas en la Ciudad de Medellín. Se analizaron edificios con alturas entre 5 y 20 pisos en pórticos o en muros de cizalladura; apoyados en cimentaciones superficiales.

El método idóneo para realizar estos análisis es el método Completo, mediante modelos de elementos finitos analizados con el programa FLUSH (Referencia)); para lo cual fue necesario desarrollar dos interfases que permitieran hacer eficiente la utilización del programa FLUSH, como son INPUT FLUSH 2005, para los datos de entrada, y OUTPUT FLUSH 2005, para el postprocesamiento de los resultados.

Este análisis paramétrico se realizó como parte de la línea de investigación en Interacción Suelo Estructura que se desarrolla en la Escuela de Ingeniería a través de dos Trabajos Dirigidos de Grado. En este artículo se presenta los resultados de los dos T.D.G..

2. INTERACCIÓN SÍSMICA SUELO-ESTRUCTURA

El fenómeno de la interacción sísmica suelo-estructura está ligado a la forma como se transmite el movimiento sísmico del terreno a la estructura a través de su cimentación. Al considerar la estructura cimentada sobre un suelo flexible y no sobre un soporte rígido se modifican significativamente los parámetros dinámicos de la estructura, así como las

características del movimiento del terreno cerca a la cimentación.

Al incidir una acción dinámica, la respuesta del suelo afecta al movimiento de la estructura y la respuesta de la estructura modifica el movimiento del suelo. La interacción Sísmica Suelo Estructura no se debe confundir con los efectos del suelo, que representan sólo las modificaciones que sufre la señal sísmica al pasar a través de un perfil de suelo o los debidos a las condiciones topográficas del sitio.

El fenómeno de la ISSE debe ser entendido como la agregación de dos tipos de efectos que se presentan simultáneamente, la interacción cinemática y la interacción inercial, que se describen a continuación.

2.1 Interacción Cinemática

Esta componente de la interacción únicamente depende de la relación de rigidez del suelo y la cimentación. Al ascender las ondas sísmicas por un perfil de suelo en campo libre se producen desplazamientos del suelo en dirección horizontal y vertical. Si la cimentación de un edificio está en la superficie o empotrada dentro de un perfil y es tan rígida que no puede seguir los patrones de deformación de campo libre, se producen modificaciones del movimiento del suelo produciendo un efecto promediador en los desplazamientos.

La interacción cinemática también puede inducir diferentes formas de vibración en una estructura cuando la fundación está embebida en un perfil de suelo sometido a la propagación de ondas s con una longitud de onda mayor o igual a la profundidad de empotramiento, caso en el cual se aplica un momento de volcamiento a la fundación a pesar de que el movimiento de campo libre sea puramente traslacional. A frecuencias mayores o longitudes de onda más cortas la rotación es nula. De forma similar, cuando las ondas se propagan horizontalmente se puede inducir vibración torsional en la fundación. (Referencia 10)

2.2 Interacción Inercial

La interacción inercial es una consecuencia que la estructura, por sí sola, responde dinámicamente en virtud de su masa, generando en el suelo un movimiento equivalente a un campo de fuerzas inerciales. Si el suelo portante es flexible las fuerzas

transmitidas a él producirán en la estructura un movimiento que no ocurriría en una estructura apoyada en una base fija. En consecuencia se producen en el suelo deformaciones diferentes a las de campo libre, que redundan en modificaciones de los movimientos de la cimentación y la estructura.

2.3 Efectos de la ISSE

Los efectos más importantes asociados con la ISSE están resumidos en el numeral A.7.1.2 de la norma NSR-98 y corresponden a las siguientes acciones:

- La distribución de esfuerzos y deformaciones bajo la cimentación varía por la presencia de suelos blandos
- Los períodos de vibración de la edificación generalmente aumentan.
- Aumenta el amortiguamiento viscoso equivalente del sistema estructura-cimentación-suelo.
- Dado que la cimentación puede rotar y trasladarse, los desplazamientos de la estructura se incrementan, magnificando los efectos P- Δ , especialmente en los edificios de gran altura.
- Cambian las fuerzas cortantes horizontales producidas por el movimiento sísmico.
- Cambian todas las sollicitaciones en los elementos estructurales.

3. MÉTODOS DE ANÁLISIS ISSE

Los métodos de análisis de problemas de ISSE se pueden dividir en dos categorías principales: métodos de sub-estructura y métodos completos o directos.

Los métodos de sub-estructura apelan al principio de superposición para separar las dos componentes de la ISSE, la interacción cinemática y la inercial. El recurso al principio de superposición hace que el uso de los métodos de sub-estructura deba restringirse a sistemas lineales.

Los métodos completos o directos modelan y analizan el sistema completo suelo-cimentación-estructura en una fase única, simplemente integrando en el tiempo las ecuaciones del sistema. Una estrategia de solución alternativa para el método global consiste en desdoblar el movimiento de entrada en sus frecuencias componentes, construir un sistema desacoplado de ecuaciones, y sumar las respuestas halladas en todas las frecuencias para calcular el

movimiento de respuesta resultante. Este procedimiento lleva a una solución “en el dominio de las frecuencias”, mientras que la integración directa es una solución “en el dominio del tiempo”.

Sin embargo, en la solución de los problemas de ISSE por métodos de sub-estructura o por métodos globales en el dominio de las frecuencias, que también hacen uso del principio de superposición, los efectos del comportamiento no lineal del suelo pueden ser tenidos en cuenta indirectamente por el empleo del método lineal equivalente.

Para este trabajo se empleó el método completo por medio del programa FLUSH (Referencia 11) el cual emplea modelos con elementos finitos que permiten representar el suelo mediante elementos sólidos y la cimentación y la estructura por medio de elementos viga, permite además considerar fronteras viscosas que evitan la concentración de ondas en los bordes de los modelos y simula el efecto tridimensional. Este programa realiza los análisis solucionando las ecuaciones del sistema en el dominio de las frecuencias modelando la rigidez del suelo y el amortiguamiento mediante el módulo de rigidez complejo. La no linealidad del suelo la simula mediante el método lineal equivalente.

Este programa está escrito originalmente en lenguaje FORTRAN y la preparación de los datos y el postprocesamiento de los resultados era bastante engorroso; razón por la cual se desarrollaron interfaces amigables en lenguaje de programación VISUAL-BASIC para el pre-procesamiento de los datos (INPUT-FLUSH-2005) y el post-procesamiento de los resultados (OUTPUT-FLUSH-2005).

4. VARIABLES INVOLUCRADAS EN EL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Como se comentó anteriormente, el estudio paramétrico estuvo orientado a identificar las variables que tienen un mayor efecto en la ISSE, y básicamente se analizaron cuatro variables:

- Rigidez del suelo, se consideraron suelos homogéneos y suelos cuya rigidez varía con la profundidad.
- Espesor del perfil de suelo.
- Impedancia con la roca sobre la cual está apoyado el perfil de suelo.

- El periodo fundamental de vibración de la estructura, empleando edificios representativos de las estructuras típicas de la ciudad de Medellín.

En este estudio no se ha considerado la sensibilidad de la respuesta de los sistemas suelo-estructura a la variación de otros factores en los perfiles de suelo como el peso específico, el índice de plasticidad, las curvas de degradación de rigidez y aumento del amortiguamiento con la deformación, la humedad, el módulo de Poisson. Los valores de estos parámetros se han considerado constantes en todos los modelos y para cualquier profundidad. Esta consideración es un poco arriesgada puesto que en general con la profundidad, el nivel de confinamiento y las características de los materiales estas variables pueden sufrir cambios apreciables.

4.1 Perfiles de suelo

Se analizaron dos tipos de perfiles de suelo, que representa las posibles condiciones de suelos que se pueden encontrar. Por una parte, se analizaron suelos homogéneos con un rango de variación de la velocidad de propagación de la onda s entre 100 m/seg y 500 m/seg, el cual es representativo del rango de velocidades obtenidas en los diferentes ensayos de campo realizados en los estudios de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Medellín y el Área Metropolitana. (Referencia 14).

En segundo lugar, se analizaron perfiles en donde se produce un incremento lineal de la velocidad de onda de corte con la profundidad, que simulan la condición que se produce en los suelos residuales (véase Figura No.1), donde los estratos superficiales, que han sufrido directamente el efecto de la meteorización, son más blandos, mientras que los estratos profundos tienen características geomecánicas superiores.

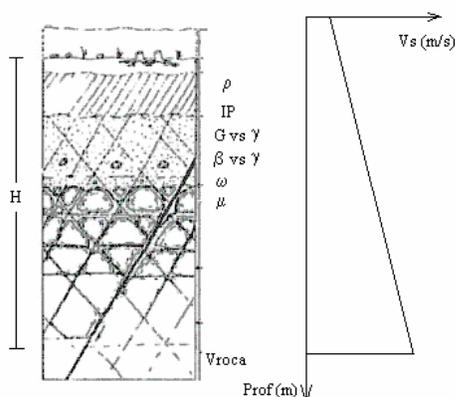


Figura 1. Esquema general del modelo simplificado asumido para suelos residuales.

En este caso se consideró una velocidad inicial en superficie de 100 m/seg y velocidades máximas en el fondo del perfil de suelo de 300, 500 y 800 m/seg.

4.2 Espesor del estrato de suelo

En el caso de suelos homogéneos se consideraron espesores de suelo de 10, 20, 30 y 40 m; mientras que en suelos con rigidez variable se consideran 3 espesores del perfil de suelo: 20m, 40m y 60m.

Estos espesores son razonablemente representativos de los perfiles de suelos encontrados en la microzonificación sísmica de Medellín.

4.3 Impedancia

La impedancia representa el contraste que existe entre las propiedades del perfil de suelo y las del material que lo subyace. La impedancia se expresa como:

$$I = (\rho_r \times V_{sr}) / (\rho_s \times V_{ss})$$

Donde:

- ρ_r : Densidad de la roca sobre la cual se apoya el suelo.
- V_{sr} : Velocidad de onda de corte en la roca.
- ρ_s : Densidad del suelo.
- V_{ss} : Velocidad de onda de corte en el suelo.

A medida que aumenta la impedancia, la amplificación de las ondas sísmicas en el perfil de suelo será mayor. (Referencia 11).

Para el análisis paramétrico se consideraron tres valores para la velocidad de propagación de la onda de corte en roca (V_r): 800 m/s, 1600 m/s y 2400 m/s. Con los cuales se reproduce el rango probable de variación de la velocidad de los diferentes tipos de rocas.

4.4 Periodo de vibración de la estructura.

Para considerar la variación del periodo de vibración de la estructura se analizaron 5 edificios típicos desplantados superficialmente sobre los perfiles de suelo definidos anteriormente.

Estas cinco estructuras consisten en 3 edificaciones en pórticos de 5, 10 y 20 pisos y 2 edificaciones en muros estructurales de 7 y 12 pisos, cuyas masas fueran equivalentes a los edificios en pórticos de 5 y 10 pisos, respectivamente.

Los edificios en pórticos estructurales se diseñaron y modelaron por Agaton y García (Referencia 1).

Los edificios en muros de cortante de 7 pisos y 12 pisos fueron diseñados y modelados en los TDG con la asesoría del Ingeniero Alvaro Perez, y con ellos se buscaba analizar, además del efecto del periodo de vibración, el efecto en la ISSE de la diferencia en la respuesta durante sismo de un edificio en pórticos al de uno en muros de cortante. Considerando que para un edificio en pórticos, la estructura es más flexible y produce desplazamientos relativos entre pisos mayores en los primeros niveles que en los últimos; mientras que los edificios con muros tienen una mayor rigidez a cargas laterales, induciendo momentos mucho mayores en la cimentación, y producen mayores desplazamientos relativos entre pisos en los niveles superiores.

El tipo de cimentación de las cinco edificaciones es de tipo superficial consistente en una losa de cimentación, excepto por el edificio de pórticos de 20 pisos, el cual se cimentó en un cajón de cimentación.

Todas las edificaciones se diseñaron con el mismo tipo de material estructural, (hormigón armado) y para ser usadas para vivienda u oficinas, ubicadas en Medellín, dimensionadas cumpliendo los requerimientos de la norma NSR-98 (Referencia 2).

Los edificios en muros estructurales tienen una altura por piso de 2.5 m para todos los pisos y constan de 7 ejes de carga en una dirección y 9 ejes de carga en la otra. Para estas edificaciones se tiene una alta densidad de muros de diversas longitudes con un espesor de 0.13 m. Las losas de piso se definieron como losas macizas armadas en dos direcciones con un espesor de 0.10 m.

Para simplificar los modelos a utilizar en el programa FLUSH, se realizó una condensación estructural que consiste en transformar la estructura tridimensional en un vástago equivalente con masas concentradas, con unas propiedades mecánicas y geométricas tales que el vástago equivalente tiene idéntico comportamiento ante cargas horizontales y similar respuesta inercial ante excitaciones dinámicas que la estructura original.

En este proceso se está suponiendo que se puede concentrar la masa del edificio en los nodos que definen los elementos “viga”, esto sería estrictamente válido para el caso de edificios en pórticos, puesto que la masa de los pisos, dada por las losas y las vigas de amarre, es mucho mayor que la dada por las columnas. En el caso de los edificios en muros estructurales de cortante, la masa de los muros es comparable con la masa total por piso; por tanto es necesario distribuir la masa entre los nudos y los elementos viga.

En la Tabla 1 se resumen las características de los edificios empleados en los análisis.

Tabla 1. Características Edificios analizados

Edificio	Sistema	Altura (m)	Masa (Ton)	Periodo (s)
5 Pisos	Pórticos	14.4	3224	0.68
7 Pisos	Muros	17.5	2941	0.28
10 Pisos	Pórticos	28.4	5304	1.11
12 Pisos	Muros	30.0	5042	0.71
20 Pisos	Pórticos	56.4	15140	2.13

5. INVARIANTES DEL ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Como se comentó anteriormente, el análisis paramétrico se concentró en las variables definidas en el inciso anterior. Las variables más importantes que no se modificaron en el estudio fueron las curvas de variación del módulo de rigidez y la fracción de amortiguamiento con el nivel de deformación y la excitación empleadas para los análisis.

5.1 Variación del módulo de rigidez y de la fracción de amortiguamiento con el nivel de deformación.

El estudio paramétrico estaba orientado a representar los suelos típicos de la ciudad de Medellín, por tanto se seleccionaron unas curvas de degradación del módulo de rigidez y de la variación de la fracción de amortiguamiento con el nivel de deformación que fueran representativas de la mayoría de suelos de la ciudad.

Debido a su origen, en términos muy generales, un alto porcentaje de los suelos presentan índices de plasticidad moderados, y por tanto se estimó que las curvas de degradación propuestas por Dobry y Vucetic (Referencia &&) para suelos con un I.P. del 15% , son razonablemente representativas y presentan similitudes con las obtenidas en los estudios de la microzonificación sísmica para los suelos residuales de gabro. En la figura 2 se presentan las curvas empleadas.

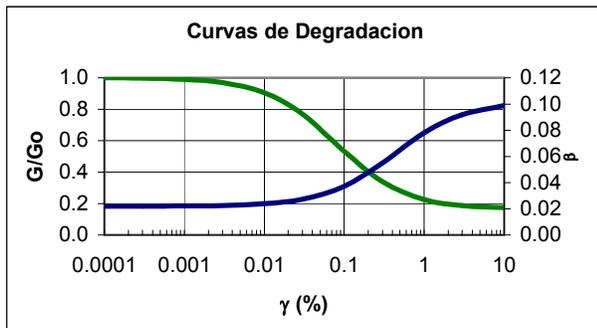


Figura 2. Curva de degradación e incremento del amortiguamiento para suelo residual de Gabro

5.2 Excitación Sísmica

Todos los sistemas suelo-cimentación- estructura fueron evaluados cuando se someten al efecto del sismo sintético de amenaza total definido para Medellín en desarrollo del Proyecto de Microzonificación sísmica de la ciudad (Referencia 14), el cual tiene un periodo de retorno de 475 años y una probabilidad de ocurrencia de 10% en 50 años. Este sismo tiene un máximo de aceleración de 0.15g, por lo que ha sido escalado para obtener un máximo en roca de 0.20g, que es la aceleración pico efectiva especificada para Medellín en el reglamento NSR-98. Véase Figura 3.

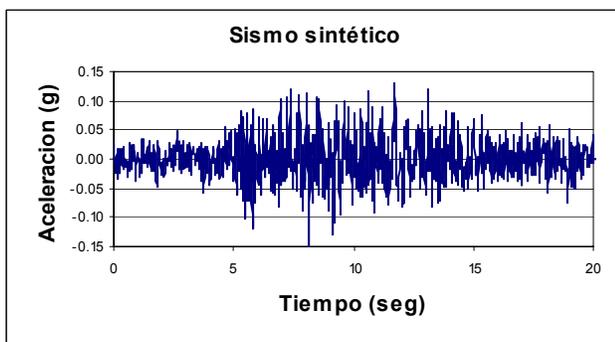


Figura 3. Acelerograma sintético

El espectro recomendado en la norma y el sismo sintético de amenaza total de la microzonificación corresponden a sismos en roca a nivel superficial (OUT-CROPPING). Con el objeto de definir las excitaciones a nivel de roca a utilizar en los modelos, se debe considerar que cuando la roca subyace un perfil de suelo se producen modificaciones al contenido frecuencial y amplificación o deamplificación en las aceleraciones del movimiento original, como consecuencia del efecto restrictivo al movimiento asociado a la masa del suelo. El sismo así modificado se denomina sismo IN-CROPPING, y la disminución en las aceleraciones que se obtiene al considerar el efecto de confinamiento del suelo es función del espesor del perfil considerado, de la impedancia y de la rigidez del suelo.

Para definir los sismos IN-CROPPING para cada espesor del suelo y cada impedancia fue necesario realizar análisis unidimensionales con el programa SHAKE (Referencia .)

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Campo libre

Con el objeto de comparar las respuestas en campo libre de los diferentes perfiles de suelo estudiados se analizó la variación de la aceleración máxima con la profundidad. En la Figura 4 se presenta la variación para el perfil de 30 m de profundidad en un suelo homogéneo; mientras que en la Figura 5 se presenta la variación para perfiles de 20 m de espesor pero con rigidez variable con la profundidad.

En la primera figura se observa como las aceleraciones alcanzadas se incrementan en la medida que se consideren suelos con velocidades de propagación mayores, debido a que en la medida que los suelos sean más blandos se producen mayores deformaciones, que en consecuencia producen mayores amortiguamientos y mayores degradaciones en la rigidez de los suelos, haciendo muy notorios los efectos no lineales del suelo. Este factor se hace más sensible debido al hecho de haber considerado que todos los suelos presentan las mismas curvas de degradación. Por otra parte se observa que en la medida que la velocidad de la roca aumenta, se producen mayores amplificaciones.

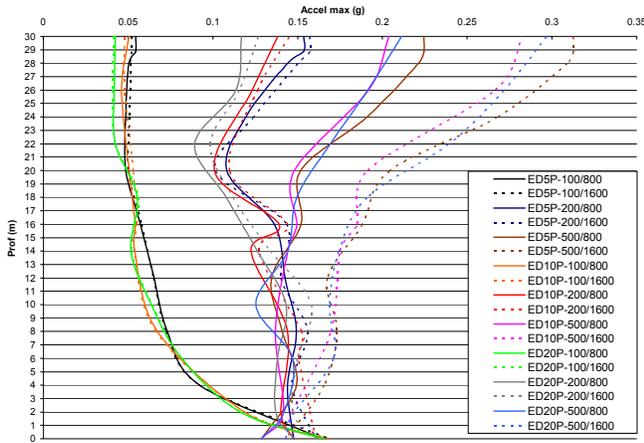


Figura 4 Variación de la aceleración con la profundidad. Suelos Homogéneos. 30 m de espesor

En la Figura 5, se presenta la variación de la aceleración con el nivel de profundidad para suelos no homogéneos en los cuales la rigidez aumenta con la profundidad, para los cuales se observa un incremento permanente de la aceleración en la medida en que se llega a la superficie del terreno, y se observa también que en la medida que aumenta la impedancia son mayores las amplificaciones.

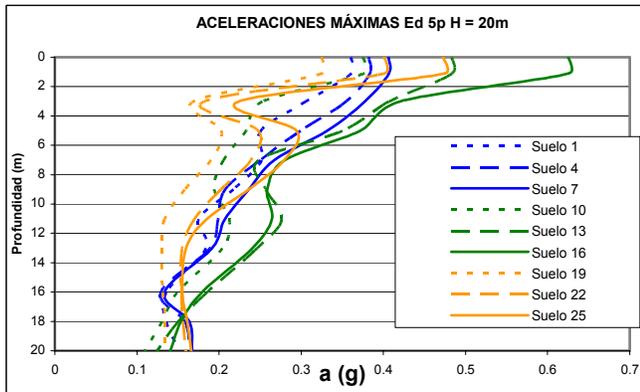


Figura 5. Variación de la aceleración con la profundidad. Suelos no homogéneos. 20m de espesor

La diferencia en el comportamiento entre los suelos homogéneos y los suelos no homogéneos se explica al analizar las curvas de variación del nivel de deformación con la profundidad. En la figura 6, se presentan las curvas obtenidas en un suelo no homogéneo con incremento de la rigidez en profundidad, en donde se observa que las deformaciones máximas sólo ocurren en una franja relativamente superficial, mientras que a profundidad

disminuyen debido a que al ser el suelo más rígido se deforma menos a pesar de que soportan los máximos esfuerzos de corte; a diferencia de los que sucede en suelos homogéneos en donde los niveles de deformación son del mismo orden en todo el perfil y alcanzan valores mayores en la profundidad, generando un mayores deformaciones, mayores degradaciones de la rigidez y mayores fracciones de amortiguamiento, que pueden llegar a producir reamplificaciones como ocurrió en el caso de suelos con un espesor de 30 m. Véase Figura 4

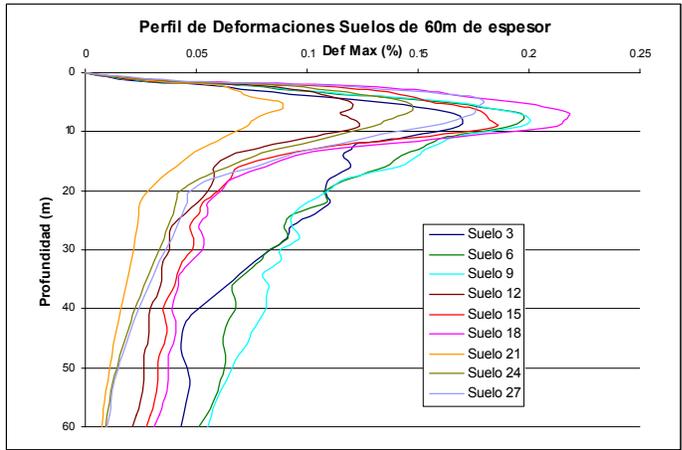


Figura 6. Perfil de deformaciones suelos de 60m de espesor

Como consecuencia de este comportamientos se puede afirmar que el efecto no lineal del suelo es más importante en perfiles de suelo homogéneos que en el caso de perfiles de suelo no homogéneos en los cuales se incrementa la rigidez con el nivel de deformación.

Así mismo se puede también suponer que al presentarse menos degradación y amortiguamiento en estos tipos de suelos, su comportamiento tenderá a ubicarse más en el rango elástico que en el plástico por lo que el calculo del periodo fundamental de vibración real del suelo, estará mucho más cercano al valor dado por la ecuación analítica: $T = 4H/V_{S_{prom}}$

6.2 Análisis de los espectros de respuesta

Con el objeto de evaluar la respuesta de los sistemas suelo-cimentación-estructura, se prepararon los espectros de respuesta para campo libre, a nivel de la superficie debajo de la estructura y en el último piso del edificio. En las figuras 7 y 8, se muestran los

resultados para edificios en pórticos de 5 y 20 pisos de altura sobre perfiles homogéneos de 20 m de altura.

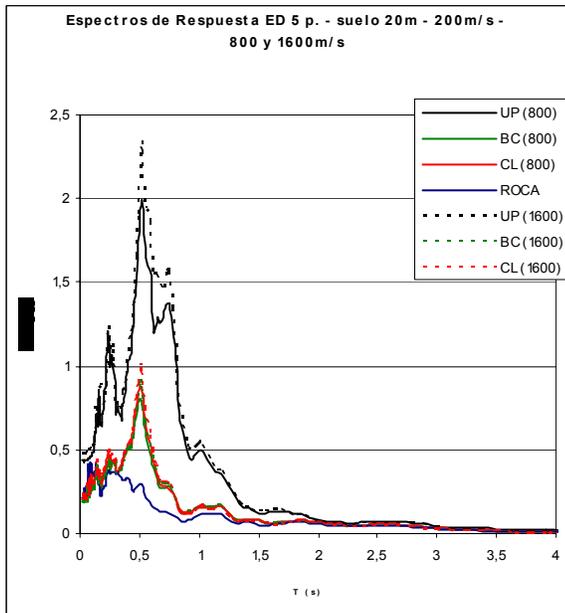


Figura 7 Espectros de respuesta de aceleración edificio 5 pisos. 5% amortiguamiento.

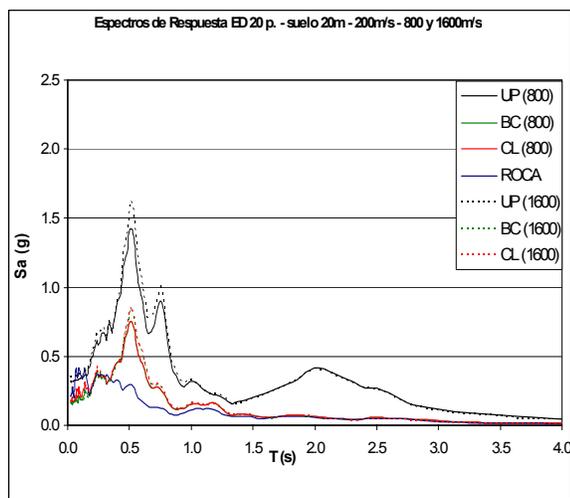


Figura 8 Espectros de respuesta de aceleración edificio 20 pisos. 5% amortiguamiento.

En estas figuras se observa que a nivel del último piso, las aceleraciones espectrales máximas son mayores en edificios de 5, y que para el periodo fundamental del edificio de 20 pisos las aceleraciones son moderadas, mientras que para modos superiores (tercer modo de vibración) se alcanzan aceleraciones

espectrales similares a las obtenidas en el edificio de 5 pisos.

En el caso de los espectros de respuesta obtenidos en suelos no homogéneos que presentan incrementos de la rigidez con la profundidad, se observa comportamientos similares de acuerdo con los cuales se pueden presentar aceleraciones espectrales muy altas en edificios de altura moderada sobre suelos relativamente rígidos.

La diferencia del comportamiento entre los edificios en pórticos y en muros de cortante se muestra en la Figura 9 para el caso de los suelos homogéneos con 20 m de espesor, y en la Figura 10 para el caso de los suelos con rigidez variable

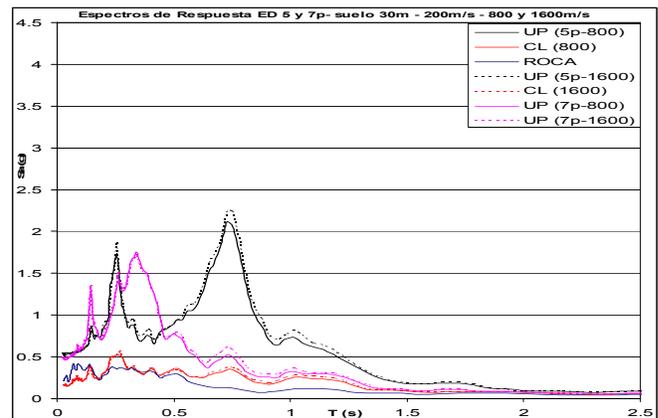


Figura N9 Espectros de respuesta de aceleración edificio de 5 pisos en pórticos y 7 pisos en muros. Suelos Homogéneos

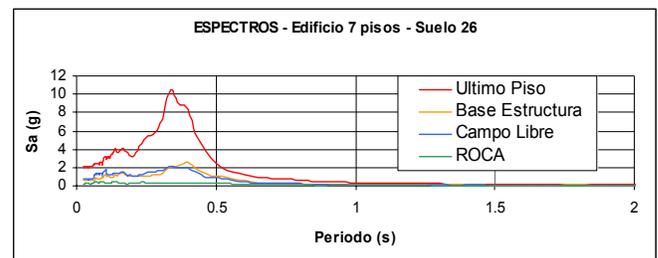
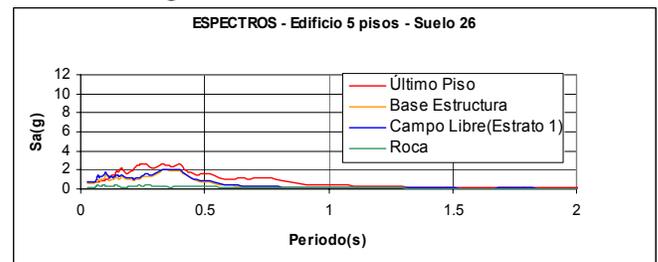


Figura N10 Espectros de respuesta de aceleración edificio de 5 pisos en pórticos y 7 pisos en muros. Suelos no Homogéneos.

En estas figuras se observa como dos edificios equivalentes en cuanto a las masas, presentan respuestas muy diferentes debido a las diferencias en el periodo de vibración, de forma que edificios más rígidos presentan aceleraciones espectrales mayores debido a que están apoyados en suelos relativamente rígidos.

Por otra parte, y tal como se observó en los estudios de la micro zonificación sísmica de Medellín y del Area metropolitana, se encontró que las formas espectrales recomendadas por la NSR98, incluso las recomendadas en el método alterno del Título H, subestiman las aceleraciones espectrales para los periodos cortos, es decir para los edificios de baja altura, mientras que para los periodos largos sobreestiman las aceleraciones espectrales para el diseño. Como se puede observar en la Figura 11.

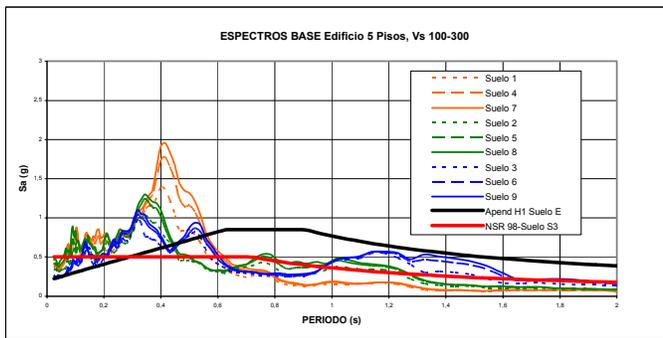


Figura 11. Espectros de respuesta base del edificio de 5 pisos. Suelos Homogéneos.

6.3 Análisis de la condición de resonancia

A pesar del número de casos analizados no fue posible establecer una relación directa entre los espesores del suelo, o la velocidad del suelo o el periodo de vibración de la estructura con los efectos de la ISSE. Se observó que un factor que relaciona las características dinámicas del perfil de suelo con los efectos de la ISSE es la coincidencia entre los periodos característicos del suelo y los de la estructura.

De forma análoga a la relación r , entre la frecuencia de la excitación (α) y la frecuencia natural de un sistema de un grado de libertad (ω_n), se propone una relación entre el periodo natural de vibración del suelo en condiciones elásticas y el periodo natural de vibración del edificio.

$$r = \frac{T_{estructura}}{T_{suelo}}$$

Este último calculado con base en la ecuación obtenida para el caso de propagación de ondas en un semiespacio elástico de acuerdo con el cual

$$T_{suelo} = 4H/V_{s_{prom}}$$

Donde H Espesor del suelo
 $V_{s_{prom}}$ Velocidad promedio de propagación de ondas s

Para suelos no homogéneos el caso de la máxima RRS (Ratio response Spectra o relación de espectros de respuesta) que representa la amplificación máxima, ver Figura 12, se observa como los valores máximos se obtienen para un valor ligeramente menor que la unidad, debido a que el periodo natural del suelo es mayor que el teórico por efectos de la no linealidad del suelo, y que para edificios muy rígidos ($r \ll 1$) las amplificaciones se reducen a valores del orden de 15, mientras que para edificios flexibles con periodos de vibración largos alcanza valores mucho menores. Algo similar ocurre en los suelos homogéneos.

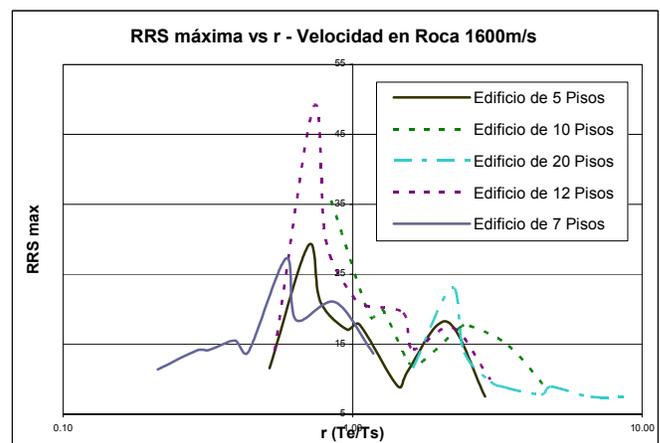


Figura 12. Gráfica de RRS máxima contra r - Velocidad en la roca 1600m/s

Los valores obtenidos para la RRS máxima en los edificios conformados por muros estructurales presentan el mismo orden de magnitud que los valores obtenidos para estructuras conformadas por pórticos,

siendo un poco mayores los valores de los edificios de muros.

Cuando se analiza la relación entre la aceleración máxima en el último piso y la aceleración máxima en el primer piso, se observa un comportamiento similar, en primer lugar se distingue una primera zona que representa los edificios muy rígidos (Te pequeños) con valores de amplificación moderados, una zona intermedia en la cual se presentan grandes amplificaciones cuando hay coincidencia y una tercera zona de edificios muy flexibles en donde se reducen notoriamente las amplificaciones, como se muestra en la Figura 13.

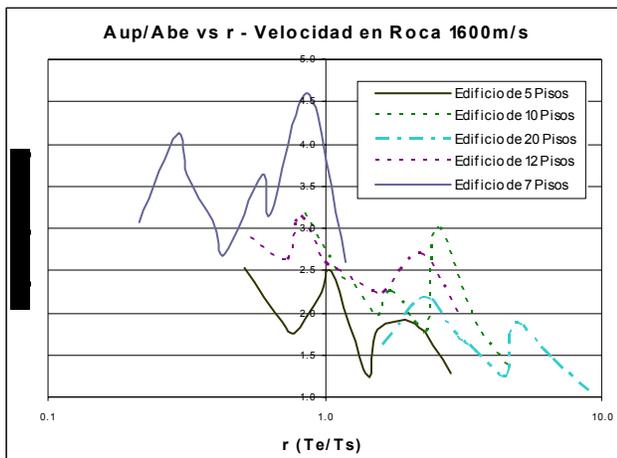


Figura 13. Gráfica de relación de aceleraciones contra r - Velocidad en la roca 1600m/s

Para las gráficas de los edificios de muros se presentan variaciones significativas con respecto a los de pórticos, los mayores valores se presentan en el edificio de 7 pisos.

Así mismo, se analizó la variación de la cortante basal con r, en donde se observó que en el caso de edificios pórticos esta relación es creciente, es decir, a medida que se aumenta el número de pisos aumenta la cortante basal, en los edificios de muros es mayor la cortante en el edificio de 7 que en el de 12 (Figura 9). Esto es explicable porque el edificio de 7 pisos tiene un periodo de vibración muy bajo, por lo que se ve afectado de manera más notoria por las componentes de alta frecuencia del sismo y los periodos fundamentales de vibración de los suelos más rígidos.

El orden de magnitud de las cortantes varía de acuerdo a la velocidad de onda en la roca; mientras

para una velocidad en la roca de 800m/s los valores de la cortante basal entre los edificios de 5 y 7 pisos es equivalente, ya no lo es para una velocidad en la roca de 1600m/s, siendo mayores las cortantes basales del edificio de 7 pisos en muros.

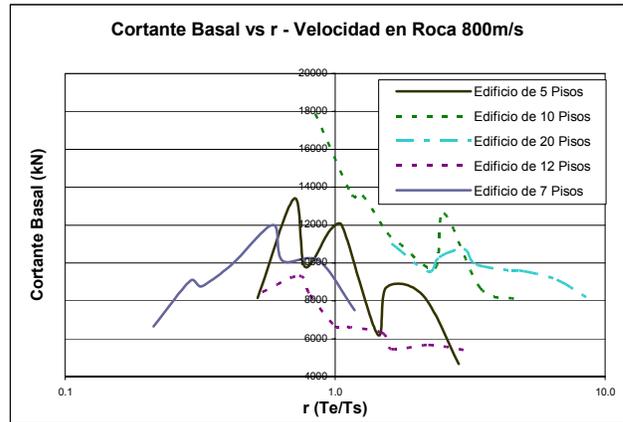


Figura 9. Gráfica de cortante basal contra r - Velocidad en roca 800m/s

5.5.4 Relación r contra Excentricidad

Las gráficas de los edificios de 12 pisos en muros estructurales y de 10 pisos en pórticos guardan mucha concordancia en cuanto a forma y orden de magnitud, lo que no ocurre para las gráficas de los edificios de 7 pisos en muros y 5 pisos en pórticos. Los valores máximos se presentan en los edificios de 7 pisos en muros estructurales.

La variación en las gráficas que se presenta por efecto del aumento de la velocidad de onda de corte en la roca, es más notoria en los edificios de 7 pisos que en los de 12, mientras que en los edificios de 12 pisos para ambos casos los valores de la gráfica son cercanos a 0.1.

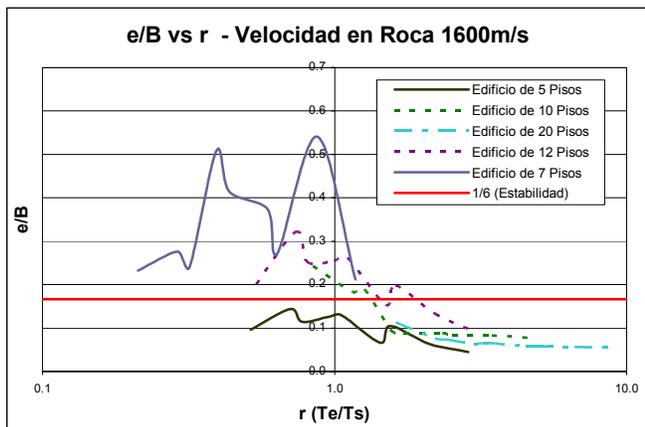


Figura 10. Gráfica de excentricidad contra r - Velocidad en roca 1600m/s

Los valores obtenidos con el edificio de 7 pisos, para las tres impedancias, son superiores al valor de $1/6$, que es el requerido para que la estructura sea estable, la mayoría de los modelos con edificio de 12 pisos también sobrepasan este valor, esto es causado por la mayor rigidez de estas estructuras con respecto a los edificios de pórticos. En los edificios de más de 10 pisos para valores de r mayores de 2.5 las curvas tienden a ser asintóticas.

6. CONCLUSIONES

- La No Linealidad de los suelos donde la velocidad de onda de corte aumenta con la profundidad toma un papel secundario en cuanto a la respuesta de estos suelos ante excitaciones sísmicas, para los cuales su comportamiento estará determinado principalmente por la configuración y magnitud de las rigideces de sus estratos. Sin embargo esta particularidad no se cumple o no es tan significativa para suelos blandos y/o de poco espesor.
- En los perfiles cuya rigidez se incrementa con la profundidad, las mayores deformaciones se presentan en los estratos superficiales. Esas deformaciones en general son pequeñas y no llegan a producir degradación importante en la rigidez del suelo, ni incrementos importantes en el amortiguamiento. De esta forma, se obtienen grandes amplificaciones del movimiento incidente a la profundidad de la roca, pues éste no se ve aminorado

significativamente por disipación viscosa de energía.

- Los perfiles considerados tienen periodos de vibración cortos, en general menores de 0.5s, que destacan los componentes de alta frecuencia del sismo. El movimiento que llega a la cimentación del edificio está compuesto predominantemente por vibraciones de alta frecuencia, como puede constatarse en los espectros en la base de la cimentación, que presentan crecimientos muy elevados -en algunos casos superiores a 2 gravedades- para periodos de oscilación muy cortos.
- Los espectros del título A.2 de la norma NSR-98, del apéndice H.2 del mismo reglamento, y de la microzonificación sísmica de Medellín, tienen ordenadas espectrales muy inferiores a las que se encuentran al realizar un análisis de la amplificación del movimiento sísmico en la masa de suelo por medio de un programa como el SHAKE o el FLUSH. Esta observación es válida para los periodos cortos del espectro, es decir, los espectros normativos *menosprecian* el contenido de alta frecuencia del movimiento que llega a la cimentación.
- En el estudio de microzonificación sísmica se encontró que los picos de los espectros para los suelos de Medellín se hallan desplazados a la izquierda (a la zona de periodos cortos) en comparación con los espectros de NERHP. Del presente trabajo se concluye que la observación es válida, no sólo para los suelos de Medellín, sino en general para perfiles relativamente rígidos y que aumentan su rigidez con la profundidad.
- Los resultados obtenidos confirman una hipótesis que se había sugerido en las primeras páginas de este documento: la importancia de los efectos de ISSE no depende de los valores de alguna variable particular, sino más bien de la forma como se combinan los valores de las diferentes variables que intervienen. No es posible sacar conclusiones generales acerca, por ejemplo, de la incidencia del espesor del depósito de suelo, si no se analiza la forma como ese espesor interactúa con otras variables, como la distribución de rigidez en el suelo, o las características de vibración intrínsecas de la estructura.

- No obstante, se ha comprobado que el efecto de la impedancia sí puede ser evaluado más o menos independientemente de las otras variables. La generalidad de los casos estudiados muestra que la impedancia sólo interviene como un agente amplificador del movimiento sísmico, que no afecta su contenido frecuencial. Esta comprobación revela que los efectos de no-linealidad del suelo tienen, en el tipo de depósitos de suelo estudiados, una relevancia moderada.
- De especial interés ha resultado el análisis de un parámetro adimensional, definido en el desarrollo de este trabajo como el cociente entre los periodos fundamentales de vibración de la estructura y el suelo. Cuando ese parámetro se acerca a 1, es decir, cuando los periodos predominantes del suelo y la edificación coinciden, se presenta una resonancia que genera las más grandes amplificaciones en las aceleraciones del sistema. Se insistirá en afirmar que la condición de resonancia es la que domina en los problemas de Interacción Sísmica Suelo-Estructura, y se reclamará que la normatividad debe centrarse en el análisis de esa condición.
- El método aproximado para considerar los efectos de ISSE del apéndice A.2 de la norma prevé una *reducción* de la cortante en la base del edificio. Sin embargo, a la luz de lo analizado hasta aquí, resulta evidente que la contingencia de la resonancia causará un *incremento* en la cortante basal y en todas las fuerzas de diseño sobre la estructura. Deben revisarse las condiciones bajo las cuales es válido emplear el método de la norma.
- Otra observación importante se refiere a la participación de modos de vibración de la estructura diferentes al fundamental, en el fenómeno de interacción con el suelo durante un evento sísmico. Se ha encontrado que no basta con tener en cuenta sólo el modo fundamental, sino que modos secundarios pueden devenir principales cuando el periodo que los caracteriza es igual –o muy cercano– al periodo típico del suelo. De hecho, en la *mayoría* de los casos en que se identificó resonancia, no fue el periodo fundamental del edificio, sino uno más corto, el que coincidió con el periodo de vibración del suelo.
- Una consecuencia de la anotación anterior es que edificaciones de baja altura, 5 pisos por ejemplo, pueden presentar interacción importante con suelos rígidos; y edificios de mediana altura, por ejemplo 10 pisos, pueden entrar en resonancia con suelos de rigidez media o de rigidez alta. Precisamente, un poco contradiciendo a la norma, el único edificio en el que no se encontraron fenómenos de interacción importantes fue el más alto, de 20 pisos. Su periodo de vibración es tan alto que nunca resonará con perfiles de suelo como los estudiados, que son más bien rígidos.
- Cuando se consideran dos edificaciones de masa similar, pero con rigideces diferentes, como son los edificios de muros estructurales, se están considerando estructuras con un menor periodo lo que conlleva a que los periodos de vibración se presenten en la parte más alta del espectro de diseño obteniéndose aceleraciones más altas para estos edificios, por lo que se presenta en ellas desestabilización por efectos del momento de vuelco.
- En un estudio paramétrico como el realizado en este trabajo se hace necesaria la utilización de herramientas que faciliten el tratamiento del gran volumen de información y resultados que se pueden llegar a manejar. Por esta razón el programa de interfaz de salida desarrollado en este trabajo, OUTPUT FLUSH 2005, se convierte en una herramienta de gran utilidad para futuros estudios de ISSE que se desarrollen con base en el programa FLUSH.
- Las disposiciones de la norma NSR-98 referentes a la consideración de los efectos de ISSE requieren una revisión profunda, puesto que queda demostrado que la importancia de estos efectos no se restringe al caso de edificios flexibles sobre suelos blandos, sino que para diferentes combinaciones paramétricas pueden ocurrir fenómenos de interacción importantes; particularmente se ha encontrado que perfiles rígidos, con características similares a los suelos de Medellín, pueden interactuar significativamente con edificios de baja y mediana altura.
- Futuros estudios deben considerar otras variables de suma importancia, como el tipo de cimentación y la profundidad de desplante, que han quedado por fuera del alcance de este trabajo. Así mismo, se piensa que es necesario conformar un grupo

interdisciplinario entre estudiantes de ingeniería civil e ingeniería de sistemas, que trabajen en la optimización del código del programa FLUSH y su integración a sistemas operativos modernos y de amplia utilización.

REFERENCIAS

1. Agaton, E. y García, H. Interacción Sísmica Suelo Estructura. Suelos y Edificios Típicos para Medellín. Trabajo dirigido de grado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 1999.
2. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. NSR-98. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. 1998
3. Barbat, A. y Canet, J. Estructuras Sometidas a Acciones Sísmicas. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Barcelona, España, 1994.
4. Botero, J. y Jaramillo, J. Evaluación de los Efectos Inerciales de Interacción Dinámica Suelo-Estructura para edificaciones Ubicadas en Medellín En Revista Universidad EAFIT, Vol. 40, No. 134, 2003.
5. Colindres, R. Dinámica de Suelos y Estructuras. Aplicadas a la Ingeniería sísmica. Editorial Limusa. México, 1983.
6. Day, R. Geotechnical Earthquake Engineering. Editorial McGraw-Hill. USA, 1997
7. Deng, N. y Bechtel Corp. FLUSH PLUS: Non Linear Soil Structure Interaction Program, At 386 Version 1.33L. San Francisco, 1993.
8. Dobry R., Vucetic , Influence of plasticity in the dynamic behaviour of cohesive soils, JGD, ASCE, 1986.
9. García, L. Dinámica Estructural y Diseño Sísmico. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, 1996.
10. Gazetas, G. y Mylonakis, G. Soil-Structure Interaction: Effects on Elastic and Inelastic Structures. Fourth International Conference on recent advances in Geotechnical Earthquake engineering and Soil dynamics and Symposium in Honor of Professor W.D. Liam Finn. San Diego, California, 2001.
11. Kramer, S. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River New Jersey, 1996.
12. Lysmer, J., Udaka, T., Chang, F., Seed, H. FLUSH: A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problem. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
13. Pecker, A. Dynamic des Sols. Ecole nationale des Ponts et chaussées, Paris, 1984.
14. Seed, H. y Idriss, I. Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute. Berkeley, California, 1982.
15. Sistema Municipal de Atención Y Prevención de Desastres (SIMPAD). Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de la Ciudad de Medellín. Municipio de Medellín, Secretaria Privada, 2000.
16. Villarraga, M. R., Garcia H., Analisis De Los Efectos De Interacción Dinámica Suelo Estructura (Idse) – Método Completo, III Encuentro De Ingenieros De Suelos Y Estructuras, Bogotá, 2003