

Aug. 79
13-XI-08

624
Cimentaciones Superficiales
Estructuras - Diseño sísmico
Interacción Suelo - Estructura
624.154?
624

624X544

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA



ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“Estudio de los Efectos de Interacción Suelo - Estructura en Cimentaciones Superficiales de Edificaciones”

TESIS DE GRADO PREVIA A
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Stalin Arturo Angamarca Morocho

DIRECTOR:

Ing. Eddie R. Tandazo Ortega

LOJA – ECUADOR

2008



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2017

CESIÓN DE DERECHOS

Stalin Arturo Angamarca Morocho, declaran conocer y aceptar la disposición del artículo 67 del estatuto orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja, que en su parte pertinente textualmente dice: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos, tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico, o institucional operativo de la universidad".



Stalin Arturo Angamarca Morocho

AUTORÍA

La responsabilidad del proceso de investigación que se ha realizado en esta tesis como: información recopilada, análisis, diseños, verificaciones, comprobaciones, conclusiones y recomendaciones que se exponen son de absoluta responsabilidad del autor.



Stalin Arturo Angamarca Morocho

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis mas sinceros agradecimientos a la UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, a sus Autoridades , a los Docentes de nuestra querida Facultad de Ingeniería Civil, por los conocimientos impartidos durante nuestra formación profesional y de manera especial al Ing. Eddie R. Tandazo Ortega, quien con su inmensa ayuda y su entrega incondicional en impartir los conocimientos para el desarrollo del presente Proyecto de Tesis.

Al mismo tiempo mi sincero agradecimiento al Ing. José Hurtado que de una u otra manera me brindo su apoyo desinteresado.



Stalin Arturo Angamarca Morocho

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a Dios principio y fin de mi existencia, de manera especial a mis queridos padres Arturo y Rosario pilares fundamentales de mi vida, a mi hijo Andy que es luz de mi existencia, a mis hermanos: Lauro, Aura, Amalia, Amando y Jorge, por su valioso apoyo brindado a lo largo de mis estudios universitarios; en especial a Verito quien es fuente de mi inspiración y ha todos los familiares y amigos que han estado presentes.

A todos ellos dedico éste mi trabajo de esfuerzo y dedicacion.

Stalin Arturo Angamarca Morocho



CONTENIDO

- I Contenido.
- II Lista de figuras.
- III Lista de tablas.
- IV Resumen.

Capítulo 1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.

- 1.1 Introducción.
- 1.2 Problemática.
- 1.3 Justificación e importancia de la investigación.
- 1.4 Objetivos.
- 1.5 Organización de la investigación.

Capítulo 2 ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA EN EDIFICACIONES.

- 2.1 Interacción suelo estructura.
- 2.2 Tipo de interacción suelo estructura.
 - 2.2.1 Interacción cinemática.
 - 2.2.2 Interacción inercial.
 - 2.2.3 Combinación de interacción cinemática e inercial.
- 2.3 Modelación matemática del problema físico existente.
- 2.4 Criterios para el análisis de interacción suelo estructura.
- 2.5 Procedimiento para incluir los efectos de interacción suelo estructura.
 - 2.5.1 Procedimiento para incluir los efectos de interacción cinemática.
 - 2.5.1 Procedimiento para incluir los efectos de interacción inercial.



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

2.6 Verificación del diseño por medio de análisis no lineal de historia en el tiempo.

2.6.1 Registros sísmicos.

Capítulo 3 APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA INFLUENCIA DE LOS EFECTOS DE ISE EN EDIFICACIONES.

3.1 Parámetros generales.

3.2 Representación de una estructura MDOF como estructura SDOF.

3.3 Acciones de diseño para la estructura MDOF a partir del cortante de un sistema de SDOF.

3.4 Procedimiento para incluir los efectos de interacción suelo estructura.

3.4.1 Procedimiento para incluir los efectos de interacción cinemática.

3.4.2 Procedimiento para incluir los efectos de interacción inercial.

3.5 Distribución de fuerzas sísmicas a los elementos.

3.6 Verificación del diseño.

3.7 Análisis de resultados.

Capítulo 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

4.2 Recomendaciones

REFERENCIAS

ANEXOS



LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Efecto sísmico en superficie. a) Campo libre b) con estructura [Soriano, 11]
- Figura 2.2 a) Cimentación en roca, b) Cimentación en estrado de suelo blando sobre roca [Canavesio, 1]
- Figura 2.3 Análisis de interacción cinemática, adaptado [Kramer, 7]
- Figura 2.4 Análisis de interacción inercial, adaptado [Kramer, 7]
- Figura 2.5 Combinación de interacción cinemática e inercial, adaptado [Soriano, 11]
- Figura 2.6 Modelo para el análisis de Interacción Suelo-Estructura: (a) Notación y parámetros del modelo, (b) Respuesta de interacción en términos de desplazamientos y rotaciones absolutas. [Veletsos, 13]
- Figura 2.7 Modelo Propuesto por FEMA 440 [FEMA 440, 6]
- Figura 2.8 a) Acelerograma de un sismo real (sismo 2), b) Acelerograma escalado y convertido en espectro.
- Figura 3.1 Configuración de la estructura. a) Vista en elevación y b) Vista en planta
- Figura 3.2 Espectro de desplazamiento.
- Figura 3.3 Espectro afectado por la Interacción cinamática aceleración vs tiempo.
- Figura 3.4 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura sin influencias de la Interacción Suelo Estructura.
- Figura 3.5 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura influenciada por la ISE con zapata aislada.
- Figura 3.6 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura influenciada por la ISE con zapata.
- Figura 3.7 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura influenciada por la ISE con losa de cimentación.
- Fig. 3.8 Perfil de Desplazamientos
- Fig. 3.9 Perfil de Derivas.



LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1 Factor “n” de Reducción de Valores Aproximados de Velocidad de onda de Corte. [FEMA 440, 6]
- Tabla 2.2 Registros sísmicos reales.
- Tabla 3.1 Dimensiones de columnas y vigas y pesos de cada piso.
- Tabla 3.2 Parámetros del suelo y diseño de las cimentaciones.
- Tabla 3.3 Cálculos para estimación de estructura sustituta. Unidades kN, m.
- Tabla 3.4 Resultado del proceso de diseño
- Tabla 3.5. Distribución de cortante a los pisos
- Tabla 3.6 Cuantías máximas y mínimas en columnas y vigas
- Tabla 3.7 Valores de S_a afectada por la Interacción cinemática.
- Tabla 3.8. Distribución de cortante a los pisos.
- Tabla 3.9 Cuantías máximas y mínimas en columnas y vigas
- Tabla 3.10 Registros sísmicos reales
- Tabla 3.11 Comparación de resultados en sentido X, Unidades en kN, m
- Tabla 3.12 Comparación de resultados en sentido Y, Unidades en kN, m
- Tabla 3.13 Comparación de desplazamientos en sentido X.
- Tabla 3.14 Comparación de desplazamientos en sentido Y.
- Tabla 3.15 Variación de derivas para el edificio que esta influenciada por la ISE en sentido X, si tiene signo (-) equivale a una reducción de derivas y cuando es (+) indica un amento de deriva
- Tabla 3.16 Variación de derivas para el edificio que esta influenciada por la ISE en sentido Y, si tiene signo (-) equivale a una reducción de derivas y cuando es (+) indica un amento de deriva
- Tabla 4 Desplazamiento máximo en cada piso en sentido X, (Unidades m).
- Tabla 5 Desplazamiento máximo en cada piso en sentido Y, (Unidades m).



**V CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA CIVIL
“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA EN
CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”**

AUTOR: Stalin Arturo Angamarca Morocho

Ing. Eddie R. Tandazo Ortega

Resumen

Este artículo presenta un análisis sobre los efectos de interacción dinámica suelo-estructura en cimentaciones superficiales de edificaciones en el diseño sísmico de estructuras por medio de espectros de respuesta en relación a la fuente sísmica y depósitos de suelos con respecto a las estructuras implantadas. Los principales efectos de la interacción dinámica suelo estructura son la adición de flexibilidad y amortiguamiento a la estructura a través de su cimentación.

La importancia del estudio minucioso de la interacción suelo estructura es revisado por modernos métodos basados en desplazamientos como el método de Diseño Directo Basado en Desplazamientos, evaluando su capacidad para considerar los efectos de la interacción suelo estructura. Se evalúan los efectos de interacción en las resistencias requeridas para sistemas inelásticos, incluyendo la interacción cinemática e inercial. Se consideran los efectos de interacción en el periodo y amortiguamiento del modo fundamental de vibración, así como en la ductilidad estructural. Se describen los modelos simplificados usados para estipular los criterios de diseño.

Finalmente como conclusión se presenta la diferencia entre edificaciones con cimentación superficial, una sin interacción y otra que si contempla esta, mostrando la importancia y relevancia de su consideración en los diseños estructurales.

Palabras claves: *Interacción Suelo-Estructura, interacción dinámica, DDBD.*

CAPÍTULO

I

**DESCRIPCIÓN GENERAL DEL
PROYECTO**



1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.

1.1 Introducción.

En la actualidad, los diseños estructurales no consideran los efectos que se producen debido a la interacción existente entre el suelo y la estructura a través de las cimentaciones superficiales. Es por ello que esta investigación pretende analizar los efectos existentes en una estructura modelo de seis pisos de altura con cimentaciones que irán variando de acuerdo al estado de esfuerzos de pre-consolidación de estratos que contenga el suelo, siendo estas zapatas aisladas, corridas y losas de cimentación.

Para su aplicabilidad se analizarán investigaciones previas referentes, estudiando varios modelos matemáticos según la problemática física, los cuales han llevado años de estudio, investigación y elaboración.

Finalmente se demostrará la importancia de la consideración de estos efectos en los diseños sísmicos de estructuras principalmente las cimentadas en suelos normalmente consolidados y de alta compresibilidad.

1.2 Problemática.

La Interacción Suelo-Estructura (ISE), es un campo de la Ingeniería Civil, el cual une a la Ingeniería Geotécnica de cimentaciones con la Ingeniería Estructural. La necesidad de esta unificación ha sido evidente por el simple hecho de que ningún edificio al momento de su diseño podría aislarse de su interacción con el suelo de fundación, existiendo un sin número de parámetros a resolver.



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO I

Los efectos de la interacción suelo-estructura tienen que ver con la flexibilidad del suelo de fundación de modo que la estructura no está empotrada en la base, por lo tanto existe un flujo de energía desde el suelo a la estructura y viceversa. Además porque influye en la determinación de los modos de vibración libre, así como en la redistribución de los esfuerzos en el edificio y cimentación, cambiando las fuerzas internas en los diferentes elementos estructurales.

1.3. Justificación e Importancia de la investigación.

Los diseños sísmicos actuales no consideran los efectos de interacción, pretendiendo empotramiento perfecto en las cimentaciones independientemente del suelo de fundación, lo cual genera comportamientos estructurales que distan de la realidad en el momento de un evento sísmico, por lo que la intención de esta investigación es presentar la necesidad de consideración de los efectos en mención en los diseños sismo resistentes.

Demostrar que los efectos de interacción suelo estructura constituyen un factor importante en el análisis sísmico, mediante la presentación de ecuaciones que estimen los efectos de interacción y su influencia en la estructura según parámetros como tipo de cimentación, profundidad de cimentación, etc. Adicionalmente presentar la importancia de realizar análisis de Interacción para los diseños dinámicos, que simule las condiciones reales de una estructura frente a un evento sísmico.

1.4 Objetivos.

- Demostrar la importancia de la consideración de efectos de interacción los cuales no se pueden considerar en todo momento como favorables o desfavorables.



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO I

- Utilizar modelos matemáticos que simulen el comportamiento de interacción que permitan entender en una forma más simple el fenómeno de interacción.
- Proporcionar ecuaciones que estimen la consideración o no de efectos en cimentaciones superficiales de edificaciones.
- Evaluar los campos de acción de interacción así como presentar la influencia de efectos en el amortiguamiento, rigidez, flexibilidad del sistema y respuesta estructural.
- Publicar resultados de la investigación mediante artículos en congresos o revistas anexadas

1.5 Organización de la investigación.

La organización de esta investigación inicia con el primer capítulo en el cual se abarca una descripción general del proyecto, teniendo como partida una introducción, problemática, justificación e importancia de la investigación, objetivos y la organización de la presente investigación.

Como segundo capítulo se trata lo que es el marco teórico, describiendo el concepto de Interacción Suelo Estructura tanto cinemática como inercial, el modelo matemático a utilizar, implantación de ecuaciones que estiman la influencia de la ISE y su análisis.

En el capítulo tres, se presenta un ejemplo de aplicación con una estructura regular en planta y en elevación de seis pisos con cimentación que irá variando de acuerdo al estado de esfuerzos de pre-consolidación de estratos que contenga el



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO I

suelo, siendo estas zapatas aisladas, corridas y losas de cimentación; a esta estructura se la diseñó previamente siguiendo el procedimiento que indica el Diseño Directo Basado en Desplazamientos (DDBD) y su posterior evaluación en el Opensees por medio de siete registros sísmicos.

Por ultimo se presenta en el capítulo cuarto las conclusiones de este trabajo investigativo y recomendaciones que deben tomarse en cuenta para futuras investigaciones en este campo.

CAPÍTULO

II

**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE
INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA
EN EDIFICACIONES**

2. ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA EN EDIFICACIONES.

2.1 Interacción suelo estructura.

La interacción suelo - estructura (ISE) es un fenómeno de la modificación de la respuesta natural de un sistema estructural debido que el suelo de alguna manera altera no sólo las condiciones de apoyo que se pueden suponer inicialmente fijas, sino también el amortiguamiento total de la construcción [Yussy C, 14].

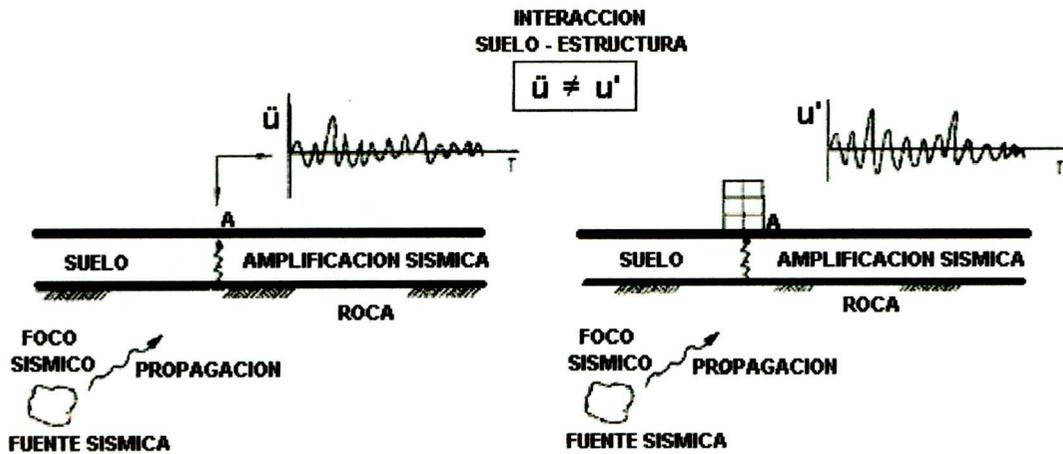


Fig. 2.1 Efecto sísmico en la superficie. a) en campo libre b) con estructura [Soriano, 11]

Una forma sencilla de entender los efectos de IDSE es mediante el monitoreo de desplazamientos; al arribar las ondas sísmicas a la superficie del suelo generan movimientos en las estructuras desplantadas sobre él; Si los desplazamientos del suelo en el campo libre \ddot{u} (Fig. 2.1 a) son diferentes de los de la cimentación de la estructura u' (Fig. 2.1 b), se dice que existe la ISE; por otro lado, si \ddot{u} es igual a u' , este fenómeno de interacción no se desarrolla.



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPÍTULO II

Básicamente puede señalarse que la interacción suelo estructura es la consideración de la flexibilidad del suelo de cimentación de modo que la estructura no se encuentra empotrada en la base, existiendo un flujo de energía desde el suelo a la estructura y viceversa.

Dependiendo de las características de la estructura y del movimiento del terreno bajo consideración, la Interacción Suelo Estructura puede aumentar o disminuir o no tener ningún efecto sobre la magnitud de las fuerzas máximas inducidas en la estructura misma.

Para entender claramente los efectos dinámicos de la ISE, es necesario tener conocimiento de los conceptos de dinámica estructural y dinámica de suelos; La dinámica estructural, se encarga de estudiar el comportamiento de los elementos estructurales y su respuesta cuando son sometidas a cargas cíclicas o sísmicas. Y la dinámica de suelos, estudia el comportamiento de los suelos y la respuesta de éstos cuando son sometidas a cargas cíclicas o sísmicas que actúan en fracciones de segundos y evalúa las propiedades del suelo cuando en él son transmitidas las ondas ocasionadas por dichas sollicitaciones.

En otras palabras, en algunos casos el efecto de la ISE en la respuesta dinámica, puede ser despreciable, hasta el punto de no ameritar su consideración, como por ejemplo, cuando una estructura ha sido cimentada sobre roca (Fig. 2.2 a) y es sometida a una excitación sísmica, la extrema rigidez de la roca limita el movimiento del medio, siendo similar al movimiento de campo libre; la excitación resulta constante a lo alto de la estructura y esto origina esfuerzos cortantes y momentos flectores en la base de la estructura. Por hipótesis la interfaz no se deforma y no sufre deslizamientos adicionales a los medidos en el punto de control.

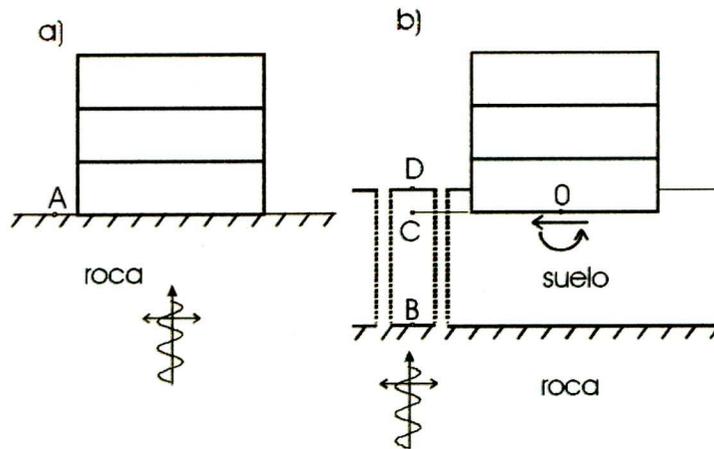


Fig. 2.2 a) Cimentación en roca b) Cimentación en estrado de suelo blando sobre roca
[Canavesio, 1]

En otros casos, el efecto de la interacción suelo estructura aumenta o disminuye el efecto de las ondas sísmicas, así por ejemplo una estructura alta o baja respectivamente que se encuentra cimentada en suelos blandos (Fig. 2.2 b) tiene una mayor flexibilidad en su fundación lo cual produce un no empotramiento en la base y ocasiona que vibren en forma independiente con la posibilidad de que exista una resonancia sísmica.

Explicando este fenómeno, podemos decir que para la estructura enterrada en suelo deformable los desplazamientos en la interfaz suelo estructura (punto 0) pueden ser distintos a los del punto de control, B, en este caso situado por debajo del estrato de suelo.

Se distinguen tres efectos, primero, la respuesta de campo libre, movimiento que tendrá un punto situado en la superficie del estrato de suelo sin excavar y sin la estructura (punto D), que en general será distinto al movimiento que tendrá la roca rígida subyacente; segundo, el movimiento medio impuesto efectivamente en la base considerada sin masa y rígida que consistirá en un movimiento horizontal promediado y una componente de giro; y tercero, las cargas inerciales, aplicadas a

la estructura producen momentos de volcamiento y esfuerzos de corte en la interfaz que es considerada deformable y esto nuevamente modifica los movimientos de la base.

2.2 Tipos de Interacción Suelo - Estructura.

2.2.1 Interacción Cinemática.

En el campo libre, un sismo causa en el suelo desplazamientos en ambas direcciones, horizontal y vertical. Si una cimentación superficial o empotrada dentro de un depósito de suelo es tan rígida que no puede seguir el patrón de deformaciones del campo libre, se dice que su movimiento está influenciado por la interacción cinemática, incluso si se considera que no tiene masa.

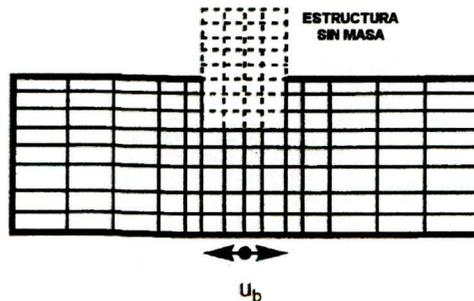


Fig. 2.3 Análisis de Interacción cinemática, adaptado [Kramer, 7]

Las deformaciones debidas a la interacción cinemática, se calculan asumiendo que la cimentación tiene rigidez, pero no tiene masa. La ecuación de movimiento para este caso es la siguiente [Kramer, 7]:

$$[M_{suelo}]\{u_{KI}\} + [K^*]\{u_{KI}\} = -[M_{suelo}]u_b(t) \quad \text{Ec. 1}$$

En donde:

$[M_{suelo}]$ = es la matriz de masa, asumiendo que la estructura y la cimentación no tienen masa.

u_{KI} = aceleración referente al movimiento de entrada en la cimentación.

u_{KI} = desplazamiento referente al movimiento de entrada en la cimentación.

u_b = aceleración en campo libre

K^* = rigidez del sistema

La interacción cinemática puede inducir diferentes modos de vibración en la estructura y ocurre cuando la rigidez del sistema de cimentación impide el desarrollo de los movimientos en campo libre. La interacción depende de la geometría de la cimentación, estratigrafía del subsuelo y naturaleza del sismo.

2.2.2. Interacción Inercial.

En este caso las estructuras y su cimentación tienen masa, y esta masa hace que tengan una respuesta dinámica. Si el suelo de apoyo es deformable, las fuerzas transmitidas a él por la cimentación producirán el movimiento de la cimentación, que no ocurriría en una estructura de base empotrada.

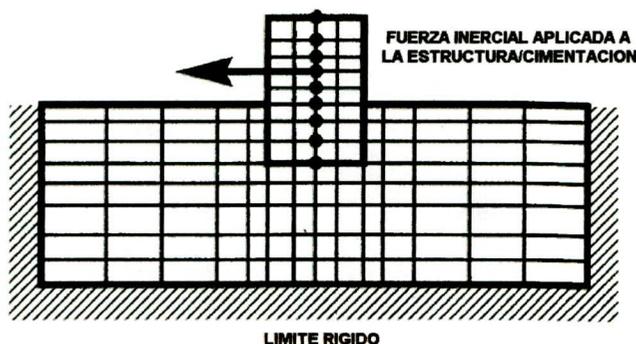


Fig. 2.4 Análisis de Interacción inercial, adaptado [Kramer, 7]



Es importante observar que en el análisis de interacción inercial, la carga inercial solo es aplicada a la estructura; Los efectos del suelo deformable en la respuesta resultante, son los debidos a la interacción inercial. Las deformaciones debidas a la interacción inercial pueden ser calculadas por las ecuaciones de movimiento. [Kramer, 7]

$$[M]\{u_{II}\} + [K^*]\{u_{II}\} = -[M_{estructura}]\{u_{KI}(t) + u_b(t)\} \quad \text{Ec. 2}$$

En donde:

$[M]$ = matriz de masa del sistema.

$[M_{estructura}]$ = matriz de masa asumiendo que el suelo no tiene masa.

u_{II} = aceleración producto de la interacción inercial.

u_{II} = desplazamiento producto de la interacción inercial.

u_{KI} = aceleración referente al movimiento de entrada de la cimentación.

u_b = aceleración en campo libre

K^* = rigidez del sistema

Nótese que la parte derecha de la ecuación (2), representa la carga inercial del sistema cimentación-estructura. La carga inercial depende del movimiento en la base y del movimiento de entrada en la cimentación, el cual refleja los efectos de la interacción cinemática.

Debido fundamentalmente a la inercia y elasticidad del sistema suelo – estructura, una estructura al ser excitada por un sismo transmitido a través del suelo, sufre un balanceo, el cual produce un alargamiento del período fundamental de vibración. El aumento en el amortiguamiento y la reducción en la ductilidad de la estructura respecto a la obtenida con apoyo indeformable son producto de la interacción inercial.

2.2.3 Combinación de interacción cinemática e inercial.

La esencia de la ISE, es que la información sísmológica se da en la superficie del terreno sin la existencia de la edificación. Como consecuencia de este fenómeno físico, surge la alteración del suelo el cual es necesario considerar en las ecuaciones de movimiento.

La solución del problema planteado para edificaciones pequeñas en el plano, fueron resueltas en forma independiente por V.N. Lombardo y V.M. Liatjer en el año 1973. Para dar una solución a este problema, se considera que el movimiento del sistema esta dado por la combinación de la interacción cinemática y la inercial.

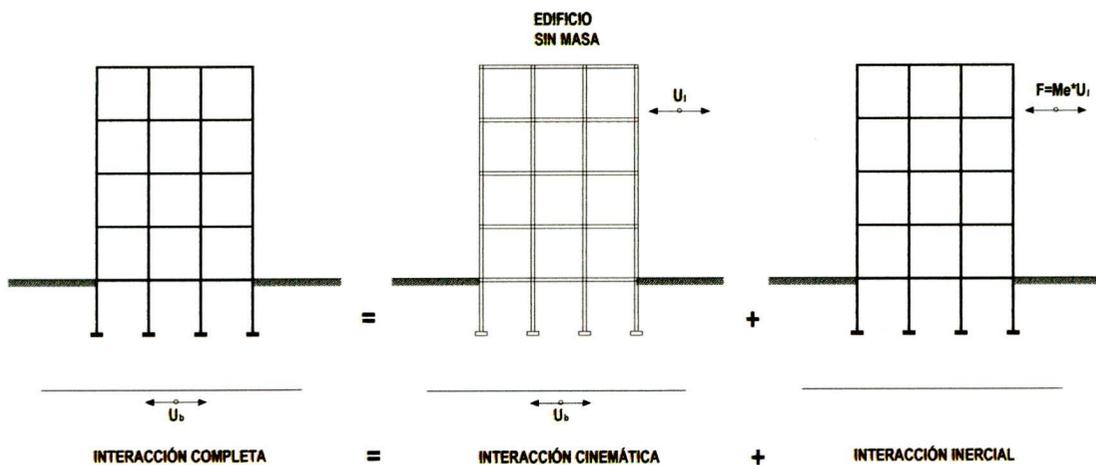


Fig. 2.5 Combinación de interacción cinemática e inercial, adaptado [Soriano, 11]

El problema completo de interacción puede ilustrarse con un esquema como el de la figura 2.5. En esa figura se indica la forma en que la ecuación matricial del movimiento puede desdoblarse en una ecuación previa, que representa la interacción cinemática, y otra ecuación que representa la interacción inercial.

El análisis de interacción cinemática da como resultado el movimiento del sistema estructura-cimentación sin masa (relativa a la base). Este movimiento combinado con el movimiento de la base, produce el movimiento cinemático total del sistema

estructura-cimentación. Cuando la carga inercial que resulta de este movimiento cinemático se aplica al sistema cimentación-estructura que esta apoyado sobre el suelo sin masa, la ecuación (2) permite el cálculo del movimiento relativo. Sumando las ecuaciones (1) y (2) tenemos:

$$[M_{suelo}]\{u_{KI}\} + [M]\{u_{II}\} + [K^*]\{u_{II} + u_{KI}\} = -([M_{estructura}] + [M_{suelo}])\{u_b\} - [M_{estructura}]\{u_{II}\} \text{ Ec.3}$$

Y si hacemos: $\{u_{KI}\} + \{u_{II}\} = u$ y $[M_{estructura}] + [M_{suelo}] = [M]$, obtenemos:

$$[M]\{u\} + [K^*]\{u\} = -[M]\{u_b(t)\}$$

La última ecuación provee la solución al problema completo de interacción suelo estructura, que es igual a la suma de las soluciones de los análisis de interacción cinemática e interacción inercial. Para fines prácticos es recomendable que estos efectos sean considerados en forma independiente, tal como se ha realizado en esta investigación.

2.3 Modelación matemática del problema físico existente.

La elección del tipo de modelo de interacción y el modelo estructural, están interrelacionados y la solución a múltiples problemas de la ingeniería sísmica sería imposible sin la elaboración fundamentada de los modelos físicos en estructuras y la creación de modelos aproximados.

Jennings y Bielak (1973) y Veletsos y Meek (1974) hicieron los primeros estudios de interacción con sistemas elásticos, usando una analogía con un oscilador simple equivalente. Ellos mostraron que los efectos de interacción inercial pueden ser suficientemente aproximados modificando simplemente el periodo fundamental y el amortiguamiento asociado de la estructura con base rígida.

El modelo considerado en este estudio, guarda mucha relación con algunos desarrollados por investigadores en el tema y está formado por una estructura elastoplástica transformada a un grado de libertad (por métodos actuales como la propuesta por Priestley en sus ecuaciones), apoyada en un cimiento rígido (cimentaciones superficiales) enterrado en un estrato de espesor constante sobre un semiespacio homogéneo, en el modo fundamental de vibración, con desplazamiento lateral de la estructura relativo al terreno.

El modelo de interacción debe incorporar tanto los efectos de interacción cinemática debidos a la diferencia entre la excitación efectiva de entrada y el movimiento de campo libre producto del cambio de impedancia entre el suelo y la cimentación de la estructura, para el caso de cimentaciones profundas o superficiales como son zapatas aisladas, zapata corrida o losa de cimentación desplazada ante la incidencia vertical de ondas de corte, así como también debe incorporar los efectos de interacción inercial debido a la respuesta del sistema estructural. Estos efectos se los evaluará de una forma independiente y al final se las superpone para obtener los resultados del sistema completo.

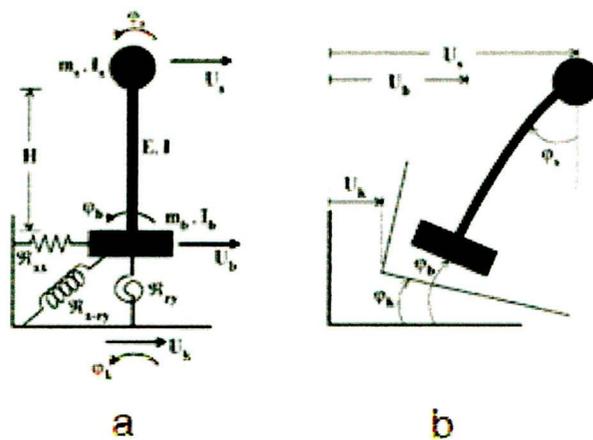


Fig. 2.6 Modelo para el análisis de interacción Suelo-Estructura: (a) Notación y parámetros del modelo (b) Respuesta de interacción en términos de desplazamientos y rotaciones absolutas. [Veletsos, 13]

El modelo simplificado de interacción suelo estructura (Fig. 2.6 a) presenta los parámetros T_e y ζ_e que son respectivamente el periodo fundamental y la fracción de amortiguamiento para las condiciones elásticas y base rígida, en la dirección del análisis. En tanto que M_e y H_e son la masa y la altura efectiva correspondiente al modo fundamental respectivamente.

En el caso de una estructura de varios grados de libertad (MDOF) como en el caso de edificaciones debe transformarse esta a una estructura de un solo grado de libertad (SDOF) mediante las siguientes ecuaciones propuestas por Priestley et al 2000 [Priestley, 10]:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}{\Delta_d}$$

Ec. 4

$$h_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i h_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}$$

Ec. 5

Donde h_i , m_i y Δ_i son respectivamente la altura, masa y desplazamiento del modo fundamental correspondientes al i -ésimo nivel sobre el desplante. Es posible mejorar la estimación de M_e y H_e tomando igual al desplazamiento lateral del i -ésimo nivel debido a las fuerzas sísmicas calculadas estáticamente.

Para tomar en consideración el aporte del suelo debido al cambio de rigidez existente con respecto a la cimentación se lo reemplaza por medio de resortes lineales K_x que estiman la rigidez y el desplazamiento lateral, resortes helicoidales K_θ que estiman la rigidez y el desplazamiento rotacional, los cuales se encuentran ejerciendo efectos en serie y por amortiguadores viscosos dependientes de la frecuencia de excitación ω que en este estudio son incluidos según FEMA (Federal Emergency Management Agency) 440 considerando el amortiguamiento del sistema únicamente en el espectro del sistema para la interacción cinemática y en la ductilidad para la interacción inercial.

FEMA 440, propone un modelo matemático donde incluye los efectos de interacción inercial y cinemática con repuesta elástica e inelástica para estructuras de un grado de libertad, el cual se presenta en la Fig. 2.7. Este modelo contempla un procedimiento de análisis estático no lineal para evaluar los efectos de interacción, los cuales se utilizará en la presente investigación.

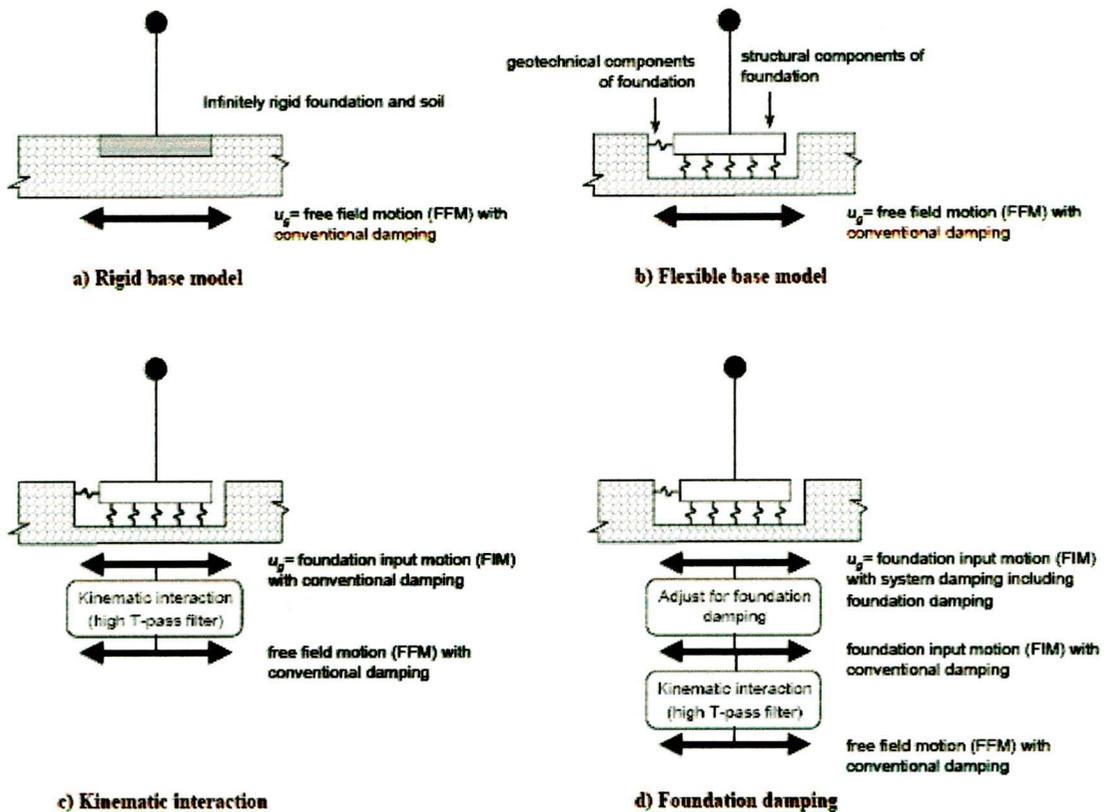


Fig. 2.7 Modelo Propuesto por FEMA 440 [FEMA 440, 6]

La Fig. 2.7 a) presenta la suposición de un modelo estructural sobre una base rígida que es excitado por un movimiento en campo libre. El movimiento en campo libre es el movimiento teórico de un punto sobre la superficie de cimentación, suponiendo que no hay estructura cerca de él.



La Fig. 2.7 b) incorpora flexibilidad a la cimentación dentro del modelo estructural, en la que FEMA 356 y Applied Technology Council (ATC)-40 incluye provisiones para estimar la flexibilidad y esfuerzos de la cimentación mediante la idealización de resortes, con un modelo estructural de análisis inelástico. Esas provisiones normalmente son usadas en el movimiento de campo libre como demanda sísmica con 5 % de amortiguamiento como un valor convencional inicial. Este enfoque es apto tanto para el modelo estructural como para los componentes geotécnicos del cimiento. Estas mejoras en el modelo pueden resultar significativas para los resultados con base fija y más exacta representación de la respuesta estructural. Comparando con el enfoque del modelo con base fija, la predicción del período prolongado de la estructura, la distribución de fuerzas entre varios elementos cambia y los mecanismos de cimentación (por ejemplo, roca, suelo blando) pueden ser evaluados y considerados directamente. Todos estos efectos resultan como una evaluación más objetiva del probable comportamiento estructural.

La Fig. 2.7 c) incluye los efectos de filtrado que la interacción suelo-estructura produce en la intensidad del movimiento de entrada del suelo para el modelo estructural. La interacción cinemática resulta de la presencia de la cimentación relativamente rígida sobre la tierra que cause que los movimientos de la cimentación se desvíen de las del campo libre. Dos efectos son identificados comúnmente: la interfaz base - losa (cimiento) y el empotramiento o profundidad de desplante; los cuales afectan las características del movimiento de cimientos - nivel (a veces llamado los movimientos ingresados a la cimentación, o FIM) en una manera que es independiente de la superestructura, pero si son energicamente dependientes del periodo, siendo maximizados en los períodos pequeños.

La Fig. 2.7 d) presenta los efectos del amortiguamiento de la cimentación que es el resultado de la interacción inercial producto de la adición de flexibilidad a la cimentación. El amortiguamiento en la cimentación resulta de los respectivos



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPÍTULO II

movimientos de la cimentación y el suelo de soporte. El resultado es un decrecimiento efectivo en los espectros ordinarios del movimiento de la tierra experimentado por la estructura.

Finalmente, el sistema propuesto por analizar, contempla el movimiento de campo libre que está influenciado por el movimientos directos de la estructura y movimientos indirectos del suelo a la estructura por medio de la ISE, definidos por la deformación de la estructura (X_e) y por el desplazamiento y rotación de la cimentación (X_c , y θ_c) respectivamente. Estos son considerados en su periodo fundamental con un sistema de un solo grado de libertad. [FEMA 440, 6]

Este análisis contempla un semiespacio homogéneo e isotrópico de un solo estrato, lo cual no es cierto pero para fines de explicación esta suposición es válida; en un problema real donde el semiespacio no es isotrópico y este a la vez está compuesto por varios estratos de rigidez variable dependientes de la frecuencia de excitación sísmica, es necesario estudiar los efectos en profundidad de la variación frecuencial que considere los modelos constitutivos del suelo donde intervenga la degradación de rigidez según el ciclo de carga aplicada, el cual nos servirá para considerar la estimación de amortiguamiento en la modelación, este tema es amplio y surge como un nueva investigación.

En algunos casos de existir una estructura regular, pese a que el análisis puede implementarse usando un método paso a paso que tenga en cuenta explícitamente el comportamiento no lineal de la estructura, para propósitos prácticos es más conveniente recurrir al uso de espectros de respuesta estándar de campo libre en combinación con las propiedades dinámicas relevantes de la estructura modificada por interacción suelo estructura.

2.4 Criterios para el análisis de interacción suelo estructura.

Es usual en la práctica evaluar los efectos de interacción reemplazando al suelo por resortes y amortiguadores constantes, los cuales dependen de la frecuencia de excitación, considerando además aspectos como la profundidad de desplante de la cimentación y el perfil estratigráfico del subsuelo.

Los efectos combinados del alargamiento del periodo, el aumento del amortiguamiento y ductilidad harán que la respuesta estructural con ISE sea menor o mayor que su valor cuando se supone base rígida, dependiendo de las características del suelo y la demanda sísmica de la zona.

Si representamos las excitaciones sísmicas por medio de espectros de diseño suavizados, una forma sencilla de conocer en la mayoría de los casos si los efectos de interacción serán beneficiosos, perjudiciales o no relevantes para su consideración es la siguiente:

- Si el periodo fundamental de la estructura sin interacción se encuentra en la meseta del espectro suavizado, es decir $T_e < T_1$ (T_e = periodo efectivo y T_1 = periodo hasta el cual el espectro es horizontal antes de que descienda), la interacción incrementará los desplazamientos que serán perjudiciales al presentarse efectos de segundo orden.
- Si el periodo fundamental de la estructura sin interacción se encuentra en la rama descendente del espectro suavizado, es decir $T_e > T_1$, la interacción incrementará los desplazamientos perjudicialmente produciendo efectos de segundo orden de no ser controlados.
- Existe una zona no definida en el espectro suavizado donde los efectos de interacción no son relevantes para su consideración, debido a que el alargamiento del periodo es contrarrestado con el aumento de



amortiguamiento, en la consideración del desplazamiento y cortante basal máximo de diseño.

En cualquier región del espectro suavizado donde caiga el periodo de la estructura T_e , un aumento del amortiguamiento se traduce en un decrecimiento de la respuesta estructural. Al mismo tiempo al incluir los efectos inelásticos de interacción, la reducción de ductilidad provocará el incremento de la respuesta estructural independientemente de la región espectral, por esta razón los efectos de interacción hay que considerarlos para cada caso en particular ya que pueden o no ser relevantes en los diseños sísmicos.

2.5 Procedimiento para incluir los efectos de ISE.

Una forma sencilla y practica para considerar los efectos de ISE es mediante la superposición de efectos por medio de la utilización de resortes lineales y helicoidales que simulen rigidez del suelo colindante, los cuales se encuentran en serie con la rigidez de la estructura, con el cual obtenemos finalmente la rigidez equivalente del sistema de una nueva estructura con empotramiento en la base considerando (efectos de cimentación flexible), el cual también considera el cambio de la respuesta estructural en el diseño sísmico debido a efectos de ISE.

La superposición de efectos será mediante lo explicado en párrafos anteriores, es decir, se tomara por separado los efectos de interacción cinemática e inercial los cuales al final se sumaran para estimar la interacción total que afecta al sistema estructural, evaluando sus desplazamientos en cada nivel.



2.5.1 Procedimiento para incluir efectos de interacción cinemática.

Los efectos de interacción cinemática tienden a ser importantes para edificaciones con periodos fundamentales relativamente cortos $T_e < 0.5s$, grandes dimensiones en planta o sótanos mayores a 3.00m; y se produce por el cambio de impedancias que existe entre la cimentación y el suelo de fundación que modifica a la condición de apoyo de la estructura.

Es importante tener en consideración que no debe utilizarse las ecuaciones que se presentaran a continuación para losas de cimentación con lado mayor a 60.00m, debido a que no existe un estudio riguroso al respecto; adicionalmente los efectos de la interacción cinemática no deben ser considerados para suelos arcillosos débiles como el caso de suelos tipo E según la clasificación NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program), adicionalmente puede ser despreciados para cimentaciones empotradas en roca firme (suelos tipo A y B). Es por ello que para nuestro estudio se considero un suelo que se clasifica como tipo C a D.

Para incluir este efecto se utiliza un factor de relación de respuesta espectral (RRS), el cual afecta a las ordenadas espectrales, el RRS es simplemente la relación de la respuesta espectral ordinaria impuesta a la cimentación (es decir el movimiento ingresado a la cimentación o FIM) a los espectros ordinarios del campo libre. Aquí dos fenómenos deben ser considerados para el valorar de RRS: el amortiguamiento de la base-cimiento y el empotramiento de la cimentación. El amortiguamiento de la base-cimiento ocurre hasta cierto punto en casi todos los edificios. Los efectos de empotramiento de la cimentación deben ser considerados con mayor razón para edificios con sótanos. Se utiliza un procedimiento simplificado (adaptado de Kim and Steward 2003) para el análisis, el cual se presenta a continuación: [FEMA 440, 6]



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPÍTULO II

1. Evaluar el tamaño de la cimentación efectiva $b_e=(a*b)^{1/2}$ donde a y b (en unidades inglesas) son las dimensiones de la cimentación de la estructura vista en planta.
2. Evaluar RRS_{bsa} que es el producto de RRS_{bsa} por RRS_e , entonces primero determino RRS_{bsa} como una función del periodo,

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14100} \left(\frac{b_e}{T} \right)^{1/2} \geq \text{Valores para } T=0.20 \text{ s.} \quad \text{Ec. 6}$$

- 3 Si la estructura tiene sótano a una profundidad e desde la superficie del suelo, evaluar un adicional RRS_e por empotramiento como función del periodo.

$$RRS_e = \cos \left(\frac{2\pi e}{TnV_s} \right) \geq \text{El mayor de 0.453 ó valor de } RRS_e \text{ para } T=0.2s \quad \text{Ec. 7}$$

Donde: e: profundidad de empotramiento

V_s : Velocidad de onda de corte, tomada como el promedio de velocidades a una profundidad de b_e debajo de la cimentación.

n: Factor de reducción de V_s para la aceleración pico del suelo (PGA).

Aceleración máxima del suelo (PGA)					
	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g	0.4g
n	0.90	0.80	0.70	0.65	0.60

Tabla 2.1 Factor “n” de Reducción de Valores Aproximados de Velocidad de onda de Corte. [FEMA 440, 6]



4. Evaluar el producto RRS_{bsa} y $RRSe$ para obtener el total RRS por cada periodo de interés, de esta forma las ordenadas espectrales del movimiento de entrada a la cimentación en cada periodo es el producto del espectro en campo libre y el total de RRS.

Repetir los pasos del 2 al 4 para los periodos restantes para generar el espectro completo de movimiento de ingreso en la cimentación.

2.5.2 Procedimiento para incluir efectos de interacción inercial.

La diferencia entre los movimientos de entrada a la cimentación y los movimientos en campo libre dan lugar a la disipación de energía vía refracción de ondas sísmicas y vía amortiguamiento histerético del suelo; esta disipación de energía afecta al amortiguamiento del sistema en conjunto, los cuales son atribuidos a la acción inercial.

ATC-40 y FEMA 356 contiene información para evaluar las propiedades de la cimentación, mediante la modelación de resortes, encontrándose su aplicación en FEMA 440 para análisis sísmico estático no lineal. Este efecto de rigidez de cimentación y amortiguamiento son frecuentemente descritos en términos de funciones de impedancia, que es de la forma como se obtienen las ecuaciones que se plantean a continuación para modelar los resortes:

$$K_x = \frac{8 \times G}{(2 - \nu)} \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \quad \text{Ec. 8}$$

$$K'_\theta = \frac{8 \times G}{3(1 - \nu)} \left(\frac{4 \times I_f}{\pi} \right)^{3/4} \quad \text{Ec. 9}$$

Para incluir este efecto se plantea un procedimiento simplificado mediante la utilización de una rigidez equivalente efectiva del sistema, mediante la sumatoria de los efectos en serie de la rigidez traslacional y rotacional producto del suelo de cimentación y la rigidez de la propia estructura, como se presenta a continuación.

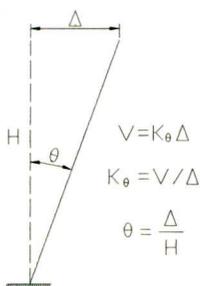
1. Calculo de área efectiva de cimentación, mediante análisis de carga de servicio como son la axial y momentos de volteo sin la consideración de interacción.
2. Estimación de Velocidad de Onda de Corte mediante ecuaciones de Correlación de la Zona ó mediante clasificación NERHP según el tipo de suelo a la profundidad de desplante.
3. Estimación del modulo de poisson (ν) según el material de cimentación; se recomienda usar valores de 0.45 para arcillas y 0.3 para arenas.
4. Calculo de Rigidez máxima del suelo de cimentación por medio de ecuaciones de correlación que incluyan la velocidad de onda de corte previamente calculada, ó mediante la siguiente ecuación obtenida de FEMA 356. [FEMA 356, 5] :

$$G = \frac{\gamma \times V_s^2}{g} \quad \text{Ec. 10}$$

5. Calculo de rigidez traslacional y rotacional según las ecuaciones 8 y 11 respectivamente,

$$K_\theta = \frac{8 \times G}{3(1-\nu)} \left(\frac{4 \times I_f}{\pi} \right)^{3/4} \left(\frac{1}{H^2} \right) \quad \text{Ec. 11}$$

La Ec. 11 esta en función del desplazamiento lateral y se la dedujo de la siguiente manera:



Del análisis momento curvatura: $K'_\theta = \frac{M}{\theta}$ (a)

Como $M = V \cdot H$, reemplazando en (a) $K'_\theta = \frac{V \times H}{\Delta / H} = \frac{V}{\Delta} H^2$

Luego $K'_\theta = K_\theta \times H^2$,

Entonces: $K_\theta = \frac{K'_\theta}{H^2}$ (b)



En la ecuación (b) se reemplaza la rigidez del suelo K_{θ} con la Ec. 9 y de esa manera se podrá considerar que actúan en serie tanto la rigidez de la estructura (K_e) como la del suelo (K_x y K_{θ}).

6. Calculo de la Rigidez de la estructura K_e , que se la determinara en función de la estructura sustituta propuesta por Priestley, siguiendo el procedimiento por DDBD desarrollada en tesis anteriores. [Caraguay, 9]:

$$K_e = 4\pi^2 \frac{m_e}{T_e^2} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde: m_e se calcula con la Ec. 4 y el periodo efectivo según la siguiente ecuación:

$$T_e = T_c \frac{\Delta_d}{S_d * R} \quad \text{Ec. 13}$$

7. Calculo de la Rigidez equivalente efectiva del sistema con la consideración de interacción, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{K_{SISTEMA}} = \frac{1}{K_{ESTRUCTURA}} + \frac{1}{K_{ROTACIÓN}} + \frac{1}{K_{TRASLACIÓN}} \quad \text{Ec. 14}$$

Luego de obtener la rigidez equivalente a la del sistema completo, se procede a calcular la fuerza de Cortante Basal máxima mediante la siguiente ecuación:

$$V_{BASAL} = K_{SISTEMA} \Delta_{\max} \quad \text{Ec. 15}$$

Estos procedimientos presentados son los propuestos para el cálculo de un sistema equivalente de un grado de libertad con interacción mediante el método de diseño por desempeño basado en FEMA 440.

2.6 Verificación del diseño por medio de Análisis no Lineal de Historia en el Tiempo (ANLHT)

Para la verificación los efectos de la ISE dentro de un análisis no lineal estático se utiliza el análisis no lineal de historia en el tiempo, por considerarse que es la mejor herramienta de análisis con la que se cuenta en la actualidad para encontrar el desempeño real de la estructura. La estructura se someterá a 7 sismos reales que fueron escalados para ser compatibles con el espectro del CEC 2000, utilizando el método propuesto por Montejo como se puede observar en la fig. 2.8. En esta investigación se utilizó el programa OPENSEES (Programa de código libre desarrollado por PEER en la Universidad de California en Berkeley) para la realización del análisis no lineal de historia en el tiempo. [Opensees, 9]

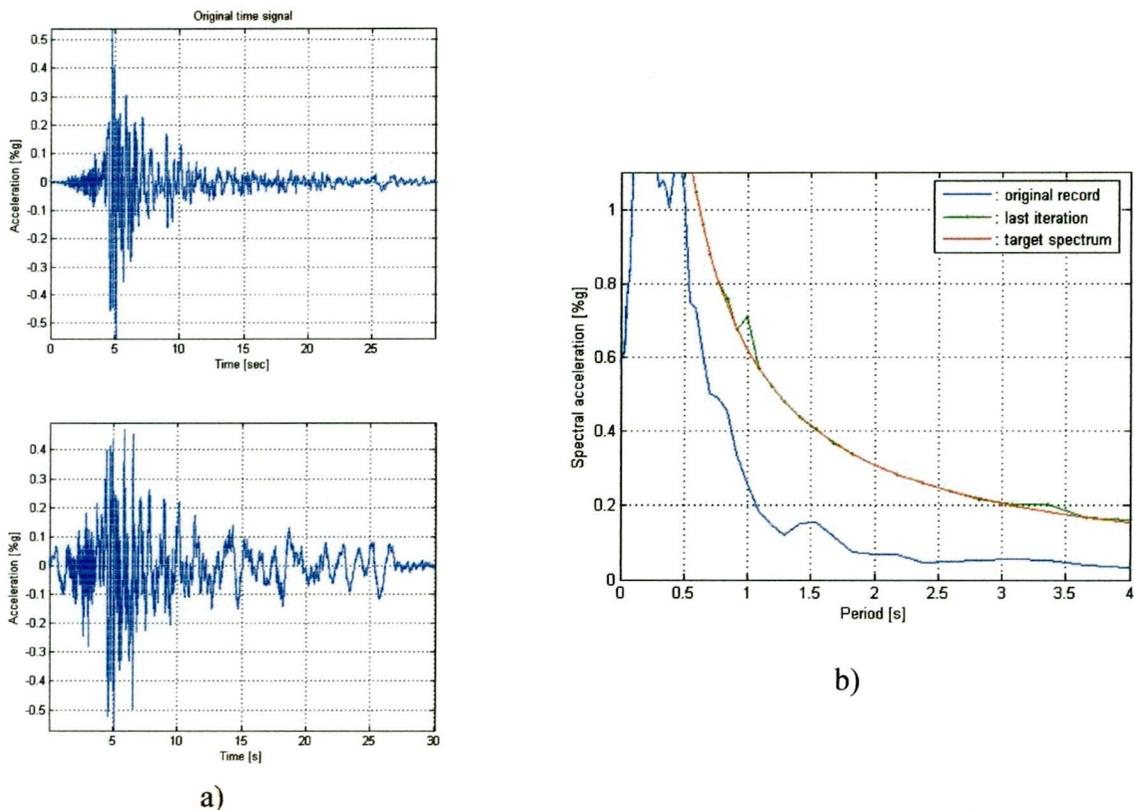


Fig. 2.8 a) Acelerograma de un sismo real 2 (Imperial Valley), b) Acelerograma escalado y convertido en espectro.

2.6.1 Registros sísmicos

Los análisis no lineales de historia en el tiempo (ANLHT) que se aplica en esta investigación son elaborados a partir de 7 sismos reales escalados a las condiciones de los depósitos de suelos locales de sitio, utilizando la técnica de transformación de “wavelets” desarrollada por Luis Montejo *et al* 2004 [Montejo, 8], los cuales se detallan a continuación:

Sismo	Fecha	Nombre del sismo	Magnitud	Nombre de la estación	PGA (cm/seg ²)
Sismo 1	1/17/1994	Northridge	6.8	Santa Monica City Hall	866.2
Sismo 2	10/15/1979	Imperial Valley	6.8	Calexico, Fire Station	269.6
Sismo 3	6/28/1992	Landers	7.5	Yermo, Fire Station	240
Sismo 4	9/12/1994	Double Spring	5.9	Woodfords	70.73
Sismo 5	6/28/1992	Landers	7.5	Palm Springs, Airport	87.2
Sismo 6	10/17/1989	Loma Prieta	7.1	Gilroy 2, Hwy 101 BRM	394.2
Sismo 7	4/24/1984	Morgan Hill	6.1	Gilroy #2, Keystone Rd.	207.9

Tabla 2.2 Registros sísmicos Reales

Los sismos reales para evaluar los efectos de interacción en su primer modo fundamental de vibración, se escalaron según el espectro de respuesta del CEC 2000 para una zona IV con suelos tipo S2. [CEC, 3]

CAPÍTULO

III

**APLICACIÓN PRÁCTICA DE
LA INFLUENCIA DE LOS EFECTOS
DE ISE EN EDIFICACIONES**

3 APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA INFLUENCIA DE LOS EFECTOS DE ISE EN EDIFICIOS.

3.1 Parámetros generales.

a) Geometría de la Estructura.- La geometría de la estructura a ser estudiada será un edificio de 6 pisos con regularidad en planta y elevación, destinada como departamentos de uso multifamiliar, constituida de 4 y 5 vanos en sentido x e y respectivamente, con una área en planta de 20.00m x 20.00m y una altura de entrepiso de 3.00 m. Las dimensiones de columna y vigas se muestran en la tabla 2.1. Los pisos son de tipo waffle con vigas descolgadas, considerándolo como piso rígido y su centro de masa esta ubicado en las coordenadas (10,10) en cada nivel.

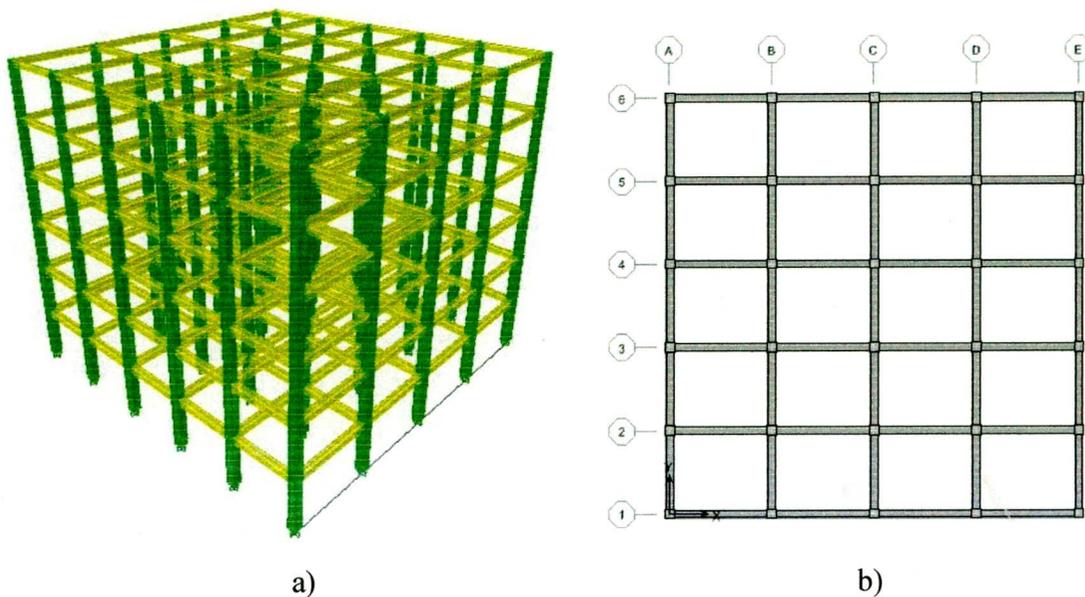


Fig. 3.1 Configuración de la estructura. a) Vista en elevación y b) Vista en planta



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO III

PISOS	COLUMNAS (m)		VIGAS (m)		PESOS
	Base	Altura	Base	Altura	KN
Piso 6	0.50	0.50	0.30	0.40	3992.655
Piso 5	0.50	0.50	0.30	0.40	4257.630
Piso 4	0.50	0.50	0.35	0.50	4542.645
Piso 3	0.60	0.60	0.35	0.50	4659.225
Piso 2	0.60	0.60	0.40	0.55	5009.010
Piso 1	0.70	0.70	0.40	0.55	5146.805

Tabla 3.1 Dimensiones de columnas y vigas y pesos de cada piso

b) Geometría de la cimentación.- Para la aplicación de esta investigación se considero una zapata aislada, pero ademas se analizó para cimentaciones con zapatas corridas y losas; las cimentaciones antes mencionadas fueron calculadas y diseñadas según criterios actuales de diseño. [Coduto, 4]

- En zapatas aisladas el diseño nos dio dimensiones de 2.50m x 2.50m como base y longitud respectivamente, aunque estas zapatas van en cada columna, para nuestro modelo propuesto necesitamos tener una cimentación representativa con sus parámetros respectivos, pues tal modelo considera una masa y altura efectiva de la estructura. El esfuerzo admisible que se considero en este tipo de cimentación es elevado, tratando de simular un estrato de suelo rígido para que la estructura este empotrada en su base.
- En zapatas corridas se obtuvo en sentido x dimensiones en la base de 1.00m en los extremos y 1.50m para las internas, con longitud de 21.00m; en sentido y la base es de 1.20m en los extremos y de 1.80m para las internas, con longitud de 21.00m. Al igual se necesitó una cimentación representativa.
- En la losa de cimentación por cubrir toda el área en planta de la estructura no se necesita tener una cimentación representativa.

La velocidad de onda de corte se considero el valor de 180 m/s ponderada en los primeros 30.00m de profundidad según la clasificación NEHRP.

A continuación se presentan los parámetros que se tomo en cuenta y sus respectivas dimensiones de diseño considerando un área total de la cimentación para toda la estructura.

Tipo de cimentación	Profundidad de desplante (m)	Esfuerzo Admisible (Ton/m ²)	Peso específico (kN/m ³)	Tipo de suelo	Velocidad de onda de corte (m/s)	Dimensiones B x L (m)	
						B	L
Zapatas aislada	2	56.667	17.7	Arcilla dura o suelo granular	180	13.693	13.693
Zapatas corrida	1.8	19.33	17.7	Arcilla firme	180	16.413	16.413
Losa de cimentación	3	8	17.7	Arcilla blanda	180	21.600	21.600

Tabla 3.2 Parámetros del suelo y diseño de las cimentaciones.

d) Propiedades de los materiales.-

- Resistencia a la compresión $f_c = 21 \text{ MPa}$
- Fluencia del acero $f_y = 420 \text{ MPa}$
- Modulo de Elasticidad del Concreto $E_c = 21538.11 \text{ MPa}$
- Modulo de Elasticidad del Acero $E_c = 200000 \text{ MPa}$
- Peso específico del Hormigón $\gamma_h = 24 \text{ kN/m}^3$

e) Demanda sísmica.- La demanda sísmica está representada por un espectro de tipo elástico para una fracción de amortiguamiento ($\xi=5$) respecto al crítico, utilizado con fines de diseño para representar los efectos dinámicos del sismo de



diseño. Este espectro es basado en las condiciones geológicas, sismológicas y del tipo de suelo asociadas con el sitio de emplazamiento de la estructura.

El espectro se caracteriza mediante: la aceleración espectral pico PSA , la aceleración pico del suelo PGA , y el Periodo (T). Para encontrar los parámetros de diseño para DDBD, como el periodo de esquina (T_c) y desplazamiento espectral máximo (Δ_{max}) se debe determinar el espectro de desplazamiento. El T_c se considera cuando la aceleración espectral se vuelve constante, a este periodo se obtiene que el pseudo desplazamiento sea igual al desplazamiento máximo. [Priestley, 10]

Con la finalidad de demostrar la influencia de los efectos de ISE se consideró una zona en la que se considera: un coeficiente “ C_b ” igual a 0.08, localizados en la zona sísmica IV del Ecuador, con un factor $Z = 0.4$, y un perfil que esta entre roca y suelo blando, con estrato profundo denominado “S2”. Con el tipo de suelo determinamos el coeficiente $S=1.2$, la aceleración máxima $C_{max} = 3.0$ y la aceleración mínima $C_{min} = 0.5$; para el cálculo de la aceleración se utiliza la Ec 16. [CEC, 3]

$$C = \frac{1.25 S^S}{T} Z \quad \text{Ec. 16}$$

Para encontrar los parámetros de la demanda sísmica necesarios para DDBD, como el periodo de esquina (T_c) y desplazamiento espectral máximo (S_D) se determinó el espectro de desplazamiento Fig. 3.2 (b).

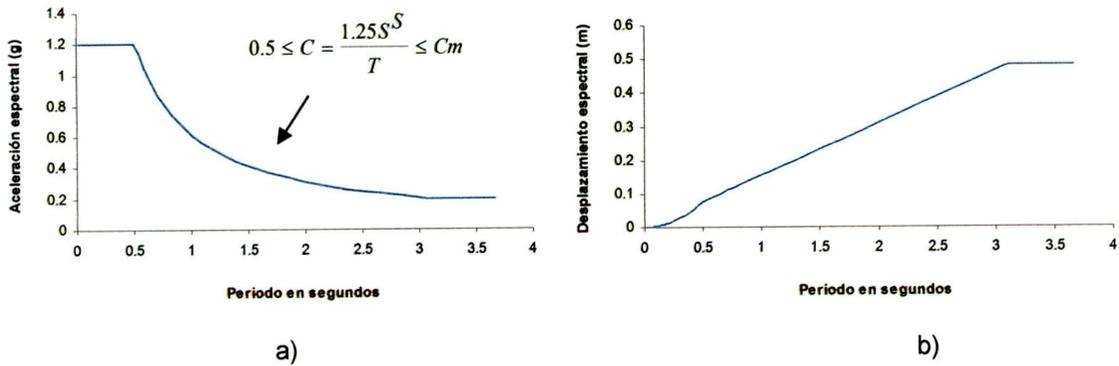


Fig. 3.2 Espectro de desplazamiento

El periodo de esquina T_c se considera para cuando la aceleración espectral se vuelve constante, a este periodo se produce el pseudo-desplazamiento $S_D = \Delta_{max}$. Para el espectro generado con las condiciones previamente descritas, se obtuvo un periodo de esquina T_c , y el pseudo desplazamiento correspondiente, igual a:

$$T_c = 3.109$$

$$S_D = 0.481$$

f) Cargas

Las cargas que se distribuyen en cada nivel son:

Carga Muerta, proveniente del peso propio de columnas y vigas, debido a cargas de paredes, entrepiso y losa, para esta investigación se tomo una carga muerta $CM = 1.9613 \text{ kN/m}^2$.

Carga Viva, se aplicó una carga de 1.9152 kN/m^2 , como uso departamental.

Carga Sísmica: La carga sísmica se aplicó directamente en el centro de masas correspondiente, la cual proviene de la demanda sísmica de diseño, y calculada mediante DDBD.

g) Desempeño esperado.- Para el DDBD se parte de un límite de deriva por piso, esto nos permite asegurar que con las secciones adoptadas se esta cumpliendo los requerimientos de diseño. Para esta investigación se tomo la deriva de diseño para un estado límite de control de daño, una deriva de diseño igual a 0.020.

3.2 Representación de una estructura MDOF como estructura SDOF.

En vista de que se aplicara el procedimiento del DDBD para pasar de una estructura de múltiples grados de libertad a una de un solo grado de libertad, encontrando la rigidez de la estructura para luego influenciarla con ISE y con ello encontraremos una rigidez total del sistema. A continuación se indica los valores de los parámetros para la estimación de la estructura sustituta.

Piso i	H _i	M _i	δ _i	Δ _i	m _i Δ _i	m _i Δ _i ²	m _i Δ _i H _i
6	18	406.998	1	0.282	114.667	32.306	2064.013
5	15	434.009	0.880	0.248	107.559	26.656	1613.382
4	12	463.063	0.741	0.209	96.639	20.168	1159.670
3	9	474.946	0.583	0.164	78.056	12.828	702.508
2	6	510.602	0.407	0.115	58.608	6.727	351.650
1	3	524.649	0.213	0.060	31.479	1.889	94.437
SUMA:					455.869	94.318	5615.120

Tabla 3.3 Cálculos para estimación de estructura sustituta. Unidades kN/g, m

Desplazamiento de diseño de estructura sustituta: $\Delta_d = 0.207$ m

Altura efectiva de estructura sustituta: $H_e = 3$ m

Masa equivalente de estructura sustituta: $m_e = 2358.225$ kN/g

Parámetro	Símbolo	X	Y
Desplazamiento de fluencia	Δ _y	0.149	0.120
Ductilidad	μ _y	1.382	1.727
Amortiguamiento Viscoso Equivalente (%)	ξ _{eq}	9.967	12.570
Factor de reducción de desplazamientos	R _ξ	0.765	0.693
Periodo efectivo de estructura sustituta	T _{eff}	1.745	1.926
Rigidez efectiva de la estructura sustituta	K _e	36677.738	31378.762
Cortante Basal de diseño	V _B	7574.505	6480.187

Tabla 3.4 Resultado del proceso de diseño

3.3 Acciones de diseño para la estructura MDOF a partir del cortante de un sistema de SDOF.

Los resultados de los cortantes obtenidos mediante el Diseño Directo Basado en Desplazamientos en los diferentes niveles de la estructura pueden apreciarse en la Tabla 3.5.

Piso i	Hi	$F_{i(x)}$	$F_{i(y)}$
6	18	2362.542	2021.216
5	15	1505.587	1288.069
4	12	1352.736	1157.301
3	9	1092.618	934.763
2	6	820.387	701.863
1	3	440.636	376.975
SUMA		7574.505	6480.187

Tabla 3.5. Distribución de cortante a los pisos

Para la distribución de fuerzas sísmicas usamos un análisis elástico ejecutado mediante Etabs v9, tomando en cuenta que para el diseño de vigas y columnas, la carga sísmica debe aplicarse directamente en el centro de masas de cada piso con una excentricidad del 5%, la cual proviene de la demanda sísmica de diseño. Además de esto se considero las combinaciones que dicta el ACI 318S-05 para el diseño de los elementos estructurales. A continuación presentamos los valores máximos y mínimos de las cuantías de columnas y vigas.

Piso	COLUMNAS		VIGAS
	$\rho_{min}\%$	$\rho_{max}\%$	$\rho_{max}\%$
6	1	1.015	0.762
5	1	1.201	1.244
4	1	2.353	0.928
3	1	1.811	1.008
2	1	2.646	0.891
1	1	2.441	0.600

Tabla 3.6 Cuantías máximas y mínimas en columnas y vigas



3.4 Procedimiento para incluir los efectos de Interacción Suelo Estructura.

Una forma sencilla y practica para considerar los efectos de ISE es mediante la superposición de efectos por medio de la utilización de resortes lineales y helicoidales que simulen rigidez del suelo colindante, los cuales se encuentran en serie con la rigidez de la estructura, con el cual obtenemos finalmente la rigidez equivalente del sistema de una nueva estructura con empotramiento en la base considerando (efectos de cimentación flexible), el cual también considera el cambio de la respuesta estructural en el diseño sísmico debido a efectos de ISE. Para la estimación de las rigideces tanto traslacionales como rotacionales, tomaremos en consideración las ecuaciones propuestas por FEMA 440.

3.4.1 Procedimiento para incluir efectos de ISE.

1. Evaluar el tamaño de la cimentación efectiva.- según el diseño para cargas de servicio, se obtuvo las siguientes dimensiones tomando en cuenta que la cimentación será representativa para toda la estructura y única:

$$\text{Base} = a = 13.693 \text{ m}$$

$$\text{Longitud} = b = 13.693 \text{ m}$$

$$be = (a \times b)^{1/2} = 13.693 \text{ m} = 44.925 \text{ ft}$$

2. Evaluar RRS que es el producto de RRS_{bsa} y RRS_e como una función del periodo, entonces tenemos primero para valores de RRS_{bsa} :

- Para valores de $T = 0 \text{ s}$ y 0.193 seg , si $T=0$ entonces se toma como valor $T=0.2$

$$RRS_{bsa} = 1 - (1/14100) * (44.925/0.2)^{1/2} = 0.953$$



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO III

- Para $T = 0.229$

$$RRS_{bsa} = 1 - (1/14100) * (44.925/0.229)^{1/2} = 0.96$$

3. Evaluar el valor de RRSe por empotramiento,

con $e = 2 \text{ m} = 6.562 \text{ ft}$

$V_s = 180 \text{ m/s} = 590.551 \text{ ft/s}$

$n = 0.6$ (de Tabla 2.1)

- Para valores de $T = 0 \text{ s}$ y 0.193 seg , si $T=0$ entonces se toma como valor $T=0.2$

$$RRS_e = \cos\left(\frac{2 \times \pi \times 6.562}{0.2 \times 0.6 \times 590.551}\right) = 0.835$$

- Para $T = 0.229$

$$RRS_e = \cos\left(\frac{2 \times \pi \times 6.562}{0.229 \times 0.6 \times 590.551}\right) = 0.874$$

4. Evaluar RRS por cada periodo de interés,

- Para valores de $T = 0 \text{ s}$ y 0.193 seg , si $T=0$ entonces se toma como valor $T=0.2$

$$RRS = 0.953 \times 0.835 = 0.955$$

- Para $T = 0.229$

$$RRS = 0.960 \times 0.874 = 1.007$$

Repetir los pasos del 2 al 4 para los periodos restantes para generar el espectro completo de movimiento de ingreso a la cimentación $S_a(\text{FiM})$, obteniendo la siguiente tabla y la grafica correspondiente del espectro:

T	Sa	RRSbsa	RRSe	(Sa)FIM
0.00	1.200	0.953	0.835	0.955
0.193	1.200	0.953	0.835	0.955
0.229	1.200	0.960	0.874	1.007
0.273	1.200	0.968	0.910	1.057
0.354	1.200	0.976	0.946	1.109
0.459	1.200	0.983	0.968	1.141
0.595	1.047	0.987	0.981	1.014
0.771	0.807	0.991	0.989	0.790
1.000	0.622	0.993	0.993	0.614
1.414	0.440	0.996	0.997	0.437
1.834	0.339	0.997	0.998	0.338
2.000	0.311	0.997	0.998	0.310
2.594	0.240	0.998	0.999	0.239
3.109	0.200	0.998	0.999	0.200
3.364	0.200	0.998	0.999	0.200

Tabla 3.7 Valores de Sa afectada por la Interacción cinemática.

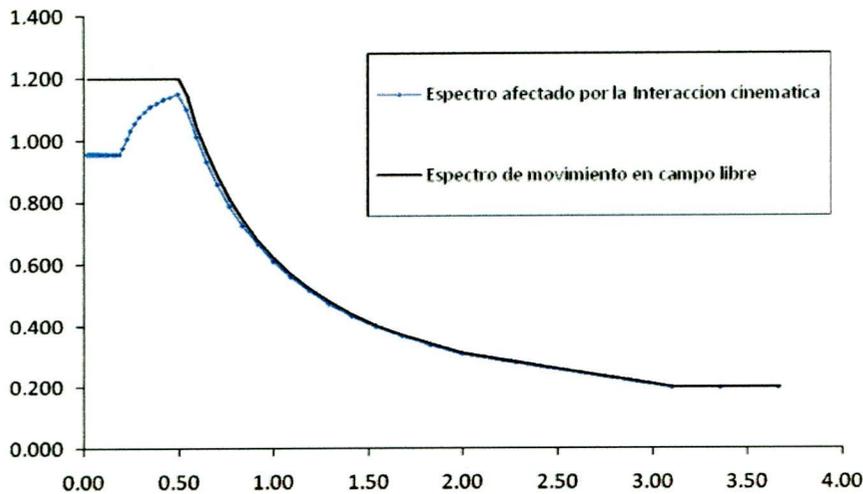


Fig. 3.3 Espectro afectado por la Interacción cinemática aceleración vs tiempo.

Para saber que influencia tiene la interacción cinemática se obtuvo nuevamente el periodo de esquina T_c y el pseudo-desplazamiento $S_D = \Delta_{max}$, teniendo:

$$T_c = 3.101 \text{ seg}$$

$$S_D = 0.478 \text{ m}$$

que son diferentes a los que se obtuvo cuando no se consideraba la interacción cinemática que eran de 3.109 y 0.481 respectivamente.



3.4.2 Procedimiento para incluir efectos de interacción inercial.

Para incluir este efecto se plantea un procedimiento simplificado mediante la utilización de una rigidez equivalente efectiva del sistema, mediante la sumatoria de los efectos en serie de la rigidez traslacional y rotacional producto del suelo de cimentación y la rigidez de la propia estructura, como se presenta a continuación.

1. Cálculo del área efectiva de cimentación.

Para realizar el análisis se debió comenzar con dimensionar la cimentación que va a junto con la estructura, la cual se diseñó con las normas actuales obteniendo las dimensiones de una cimentación representativa para toda la estructura:

Base: $a = 13.693 \text{ m}$

Longitud: $b = 13.693 \text{ m}$

Área: $A = 13.693 \times 13.693 = 187.50 \text{ m}^2$

2. Estimación de Velocidad de Onda de Corte

Se consideró en función a la clasificación NERHP (Nacional Earthquake Hazards Reduction Program) como un suelo tipo D, teniendo:

$V_s = 180 \text{ m/s}$

$= 590.551 \text{ ft/s}$

3. Estimación del modulo de poisson:

Se tomo $\nu = 0.45$

4. Calculo de Rigidez máxima del suelo

Se calcula por medio de la ecuación propuesta por FEMA 356:

$$G = \frac{17.7 \times 180^2}{9.81} = 58458.72 \text{ KN} / \text{m}^2$$



5. Calculo de la rigidez traslacional y rotacional.

Rigidez traslacional:

$$K_x = \frac{8 \times 58458.72}{(2 - 0.45)} \sqrt{\frac{187.50}{\pi}} = 55\,330\,951.61 \text{ KN / m}$$

Rigidez rotacional:

Determinamos la inercia de la cimentación

$$I_f = \frac{13.693 \times 13.693^3}{12} = 2929.688 \text{ m}^4$$

$$K_\theta = \frac{8 \times 58458.72}{3 \times (1 - 0.45)} \left(\frac{4 \times 2929.688}{\pi} \right)^{3/4} \times \left(\frac{1}{12.291^2} \right) = 895\,578.876 \text{ KN / m}$$

6. Calculo de la Rigidez de la estructura K_e según DDBD:

Se debe calcular la rigidez para las dos direcciones tanto en x como en y, además se debe considerar previamente la interacción cinemática; por lo tanto calculamos primero el periodo efectivo influenciada y luego su rigidez:

Rigidez en sentido X, considerando 6 pórticos:

Periodo efectivo

$$T_e = 3.101 \times \frac{0.207}{0.478 \times 0.7648} = 1.7517 \text{ seg}$$

$$K_e = \left[4 \times \pi^2 \frac{471.645}{1.752^2} \right] \times 6 = 36\,408.777 \text{ KN / m}$$

Rigidez en sentido Y, considerando 5 pórticos:

Periodo efectivo

$$T_e = 3.101 \times \frac{0.207}{0.478 \times 0.6931} = 1.9329 \text{ seg}$$

$$K_e = \left[4 \times \pi^2 \frac{589.556}{1.9329^2} \right] \times 5 = 31.148.660 \text{ KN / m}$$



7. Calculo de la Rigidez equivalente efectiva del sistema

Sentido X:

$$\frac{1}{K_{sistema}} = \frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_\theta} + \frac{1}{K_x}$$

$$K_{sistema} = 34\,469.078 \text{ KN / m}$$

Sentido Y:

$$\frac{1}{K_{sistema}} = \frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_\theta} + \frac{1}{K_x}$$

$$K_{sistema} = 29\,717.933 \text{ KN / m}$$

Cálculo de la fuerza Cortante Basal máxima mediante la siguiente ecuación:

Sentido X:

$$V_{BASAL} = 34469.078 \times 0.207 = 7118.384 \text{ KN}$$

Sentido Y:

$$V_{BASAL} = 29717.933 \times 0.207 = 6\,137.201 \text{ KN}$$

Los resultados de los cortantes obtenidos mediante el Diseño Directo Basado en Desplazamientos influenciada por la Interacción suelo estructura en los diferentes niveles del edificio pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Piso i	F _{i(x)} (KN)	F _{i(y)} (KN)
6	2220.274	1914.236
5	1414.923	1219.893
4	1271.277	1096.047
3	1026.823	885.288
2	770.985	664.714
1	414.102	357.023

Tabla 3.8. Distribución de cortante a los pisos



Este procedimiento se efectúa para cada una de las cimentaciones que van a ir variando en función de estado de esfuerzos de pre-consolidación de estratos que contenga el suelo, siendo luego zapatas corridas y losas de cimentación.

3.5 Distribución de fuerzas sísmicas a los elementos.

Al igual que la estructura que no fue influenciada por la ISE, aquí también se distribución de fuerzas sísmicas mediante un análisis elástico ejecutado con el ETABs v9, tomando en cuenta que para el diseño de vigas y columnas, la carga sísmica debe aplicarse directamente en el centro de masas de cada piso.

A continuación presentamos los valores máximos y mínimos de las cuantías de columnas y vigas que resultaron de la aplicación de las fuerza sísmicas para cada modelo sean estas la estructura con zapata aislada (ZA), zapata corrida (ZC) o losa de cimentación (LC), mostradas en la siguiente tabla.

Piso	COLUMNAS				VIGAS			
	$\rho_{max}\%$ (sin ISE)	$\rho_{max}\%$ (con ISE en ZA)	$\rho_{max}\%$ (con ISE en ZC)	$\rho_{max}\%$ (con ISE en LC)	$\rho_{max}\%$ (sin ISE)	$\rho_{max}\%$ (con ISE en ZA)	$\rho_{max}\%$ (con ISE en ZC)	$\rho_{max}\%$ (con ISE en LC)
6	1.029	1.000	1.006	1.011	0.775	0.741	0.752	0.758
5	1.245	1.146	1.174	1.189	1.269	1.209	1.229	1.238
4	2.452	2.208	2.289	2.328	0.952	0.899	0.916	0.924
3	1.892	1.711	1.772	1.801	1.036	0.977	0.996	1.005
2	2.791	2.517	2.599	2.641	0.918	0.865	0.882	0.890
1	2.574	2.310	2.398	2.441	0.617	0.584	0.595	0.600

Tabla 3.9 Cuantías máximas y mínimas en columnas y vigas

3.6 Verificación del diseño.

El Análisis no lineal de historia en el tiempo (ANLHT) se lo realizó mediante el OPENSEES. Para la demanda sísmica se considero siete acelerogramas de



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO III

sismos reales (Tabla 3.10), los mismos que fueron escalados al espectro de diseño, definida según el CEC con el tipo de zona IV y suelo S2, siguiendo la metodología basado en la descomposición de ondas [Montejo, 8]

Sismo	Fecha	Nombre del sismo	Magnitud	Nombre de la estación	PGA (cm/seg ²)
Sismo 1	1/17/1994	Northridge	6.8	Santa Monica City Hall	866.2
Sismo 2	10/15/1979	Imperial Valley	6.8	Calexico, Fire Station	269.6
Sismo 3	6/28/1992	Landers	7.5	Yermo, Fire Station	240
Sismo 4	9/12/1994	Double Spring	5.9	Woodfords	70.73
Sismo 5	6/28/1992	Landers	7.5	Palm Springs, Airport	87.2
Sismo 6	10/17/1989	Loma Prieta	7.1	Gilroy 2, Hwy 101 BRM	394.2
Sismo 7	4/24/1984	Morgan Hill	6.1	Gilroy #2, Keystone Rd.	207.9

Tabla 3.10 Registros sísmicos Reales

3.7 Análisis de resultados

Se analiza la influencia que tuvo la interacción cinemática, la interacción inercial, y su combinación en la respuesta de la estructura, previamente a determinar los cortantes de piso, las cuales se resumen en las siguientes tablas.

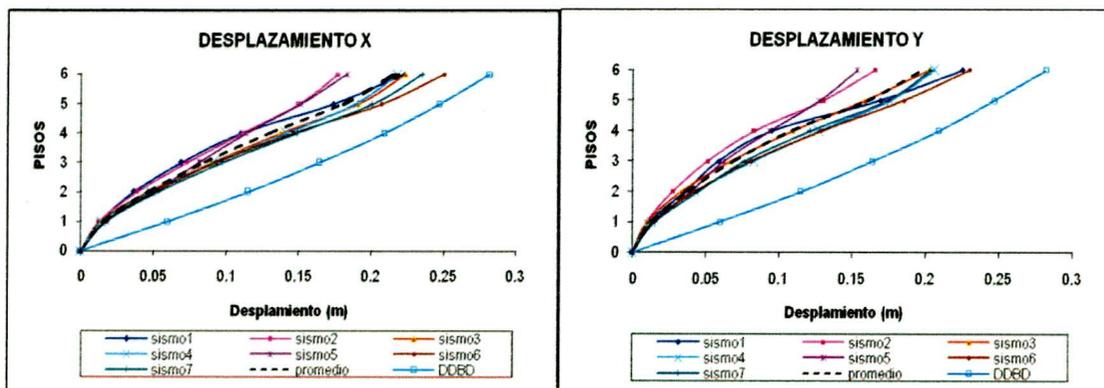
Parámetro	SIN ISE	CON ISE EN ZA	CON ISE EN ZC	CON ISE EN LC
Desplazamiento de fluencia Δy	0.1495	0.1485	0.1487	0.1479
Ductilidad μ	1.3815	1.3910	1.3889	1.3960
Amortiguamiento Viscoso Equivalente % ξ_{eq}	9.9665	10.0549	10.0356	10.1016
Factor de reducción de desplazamientos R	0.7648	0.7620	0.7626	0.7606
Periodo efectivo de estructura sustituta T_e	1.7453	1.7515	1.7503	1.7551
Rigidez del sistema K_e	36677.738	34469.078	35176.345	35550.843
Cortante Basal de diseño V_{basal}	7574.505	7118.384	7264.445	7341.785

Tabla 3.11 Comparación de resultados en sentido X, Unidades en KN, m

Parámetro	SIN ISE	CON ISE EN ZA	CON ISE EN ZC	CON ISE EN LC
Desplazamiento de fluencia Δy	0.1196	0.1184	0.1186	0.1177
Ductilidad μ	1.7269	1.7449	1.7410	1.7546
Amortiguamiento Viscoso Equivalente % ξ_{eq}	12.5701	12.6777	12.6542	12.7346
Factor de reducción de desplazamientos R	0.6931	0.6906	0.6911	0.6893
Periodo efectivo de estructura sustituta T_e	1.9258	1.9329	1.9313	1.9366
Rigidez del sistema K_e	31378.762	29717.933	30248.969	30501.847
Cortante Basal de diseño V_{basal}	6480.187	6137.201	6246.868	6299.091

Tabla 3.12 Comparación de resultados en sentido Y, Unidades en KN, m

Para efectuar el ANLHT, se consideró las combinaciones de carga sísmica como 1 SX + 0.3 SY y 0.3 SX + 1 SY, para cada uno de los siete sismos enumerados en la Tabla 3.10, obteniendo posteriormente un promedio de ellos con el cual se hará la comparación respectiva. Del mencionado análisis, se obtuvo el perfil de desplazamientos máximos para cada piso en el sentido X, y en el sentido Y (Tablas 4 en anexo 1), los cuales podemos observar en las siguientes gráficas, así como también las derivas correspondientes.



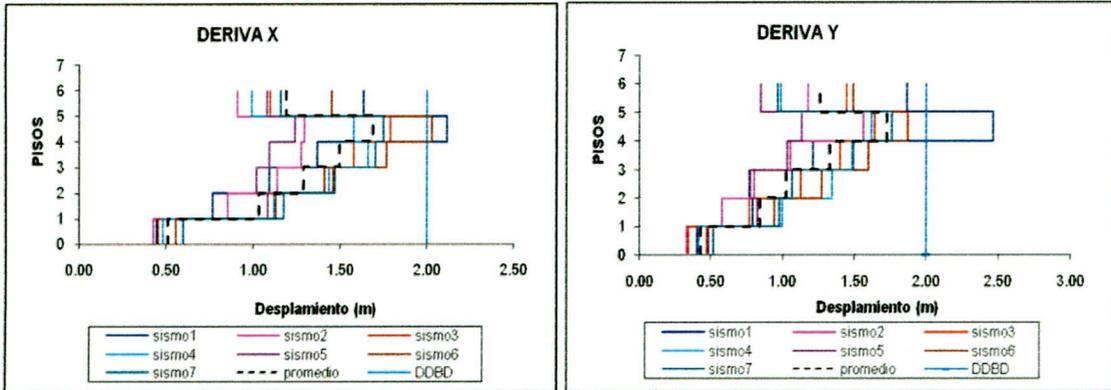


Fig. 3.4 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura sin influencias de la ISE

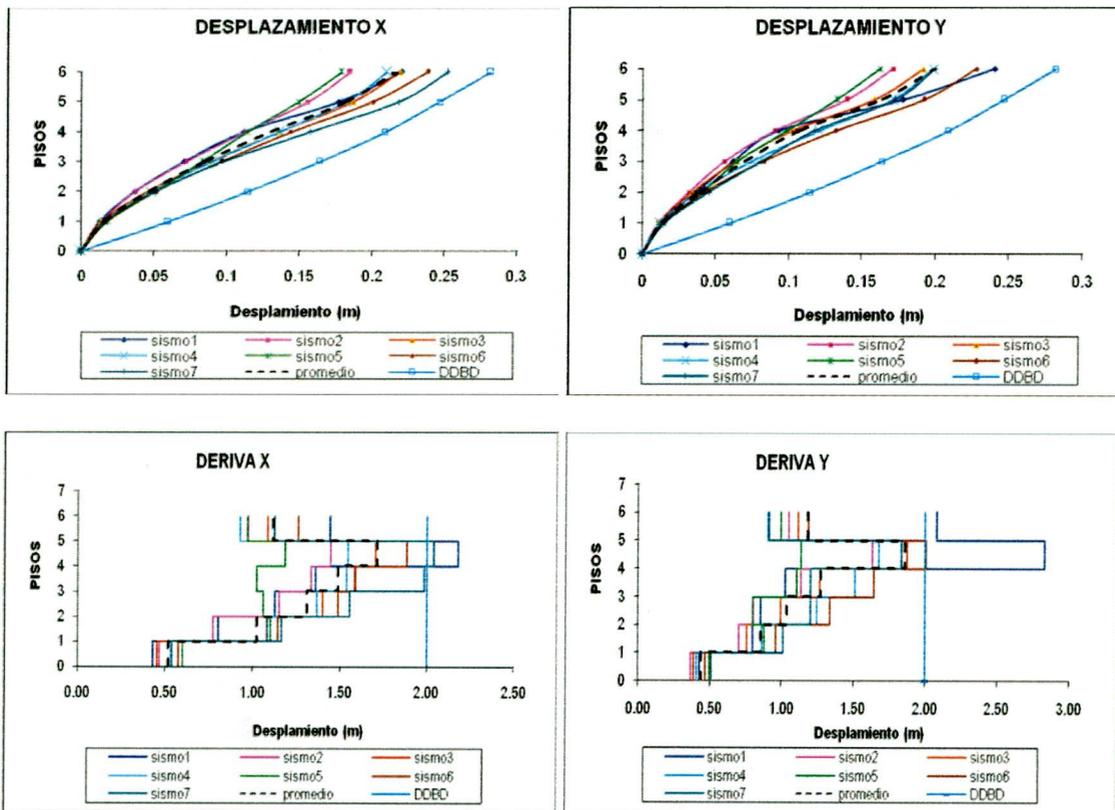


Fig. 3.5 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura influenciada por la ISE con zapata aislada.

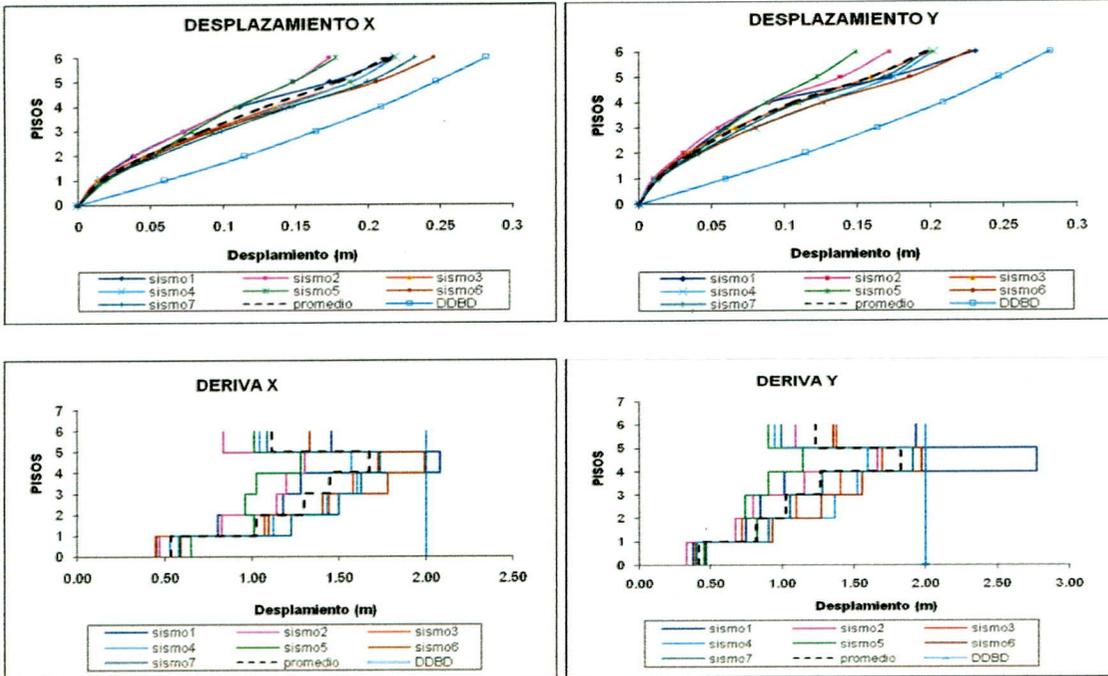


Fig. 3.6 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura influenciada por la ISE con zapata corrida.

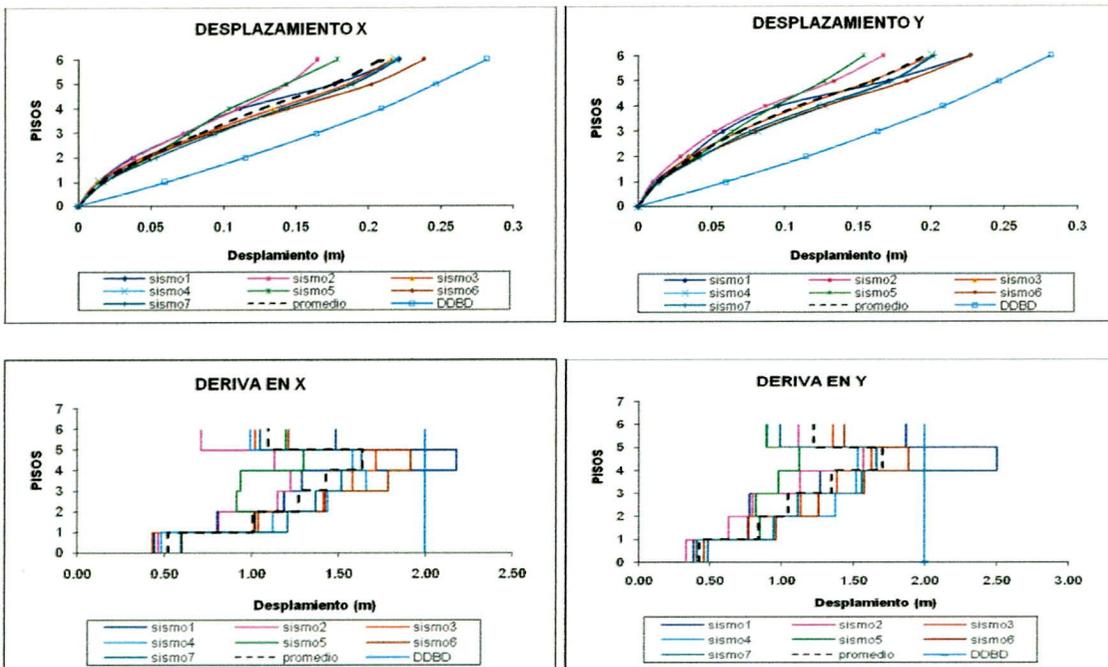


Fig. 3.7 Perfil de desplazamiento y deriva de la estructura influenciada por la ISE con losa de cimentación.



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO III

Para comparar la influencia de la ISE que ha tenido la estructura según el tipo de cimentación, se mostrara los promedios de los perfiles de desplazamiento tanto en sentido x (Tabla 3.13) como en sentido y (Tabla 3.14), además los valores del perfil obtenido por el DDBD.

DESPLAZAMIENTO EN SENTIDO X					
PISOS	DDBD	SIN ISE	CON ISE EN ZA	CON ISE EN ZC	CON ISE EN LC
1	0.060	0.015	0.015	0.016	0.015
2	0.115	0.046	0.046	0.047	0.046
3	0.164	0.085	0.085	0.085	0.084
4	0.209	0.130	0.130	0.129	0.126
5	0.247	0.180	0.182	0.179	0.176
6	0.282	0.216	0.215	0.212	0.208

Tabla 3.13 Comparación de desplazamientos en sentido X.

DESPLAZAMIENTO EN SENTIDO Y					
PISOS	DDBD	SIN ISE	CON ISE EN ZA	CON ISE EN ZC	CON ISE EN LC
1	0.060	0.013	0.013	0.012	0.013
2	0.115	0.038	0.039	0.037	0.038
3	0.164	0.069	0.070	0.068	0.069
4	0.209	0.109	0.108	0.106	0.109
5	0.247	0.160	0.164	0.160	0.161
6	0.282	0.198	0.199	0.197	0.197

Tabla 3.14 Comparación de desplazamientos en sentido Y.

En las siguientes gráficas, podemos observar los promedios de los perfiles de desplazamientos en cada sentido para la estructura sin afectación de ISE y con afectación, así como también las derivas correspondientes.

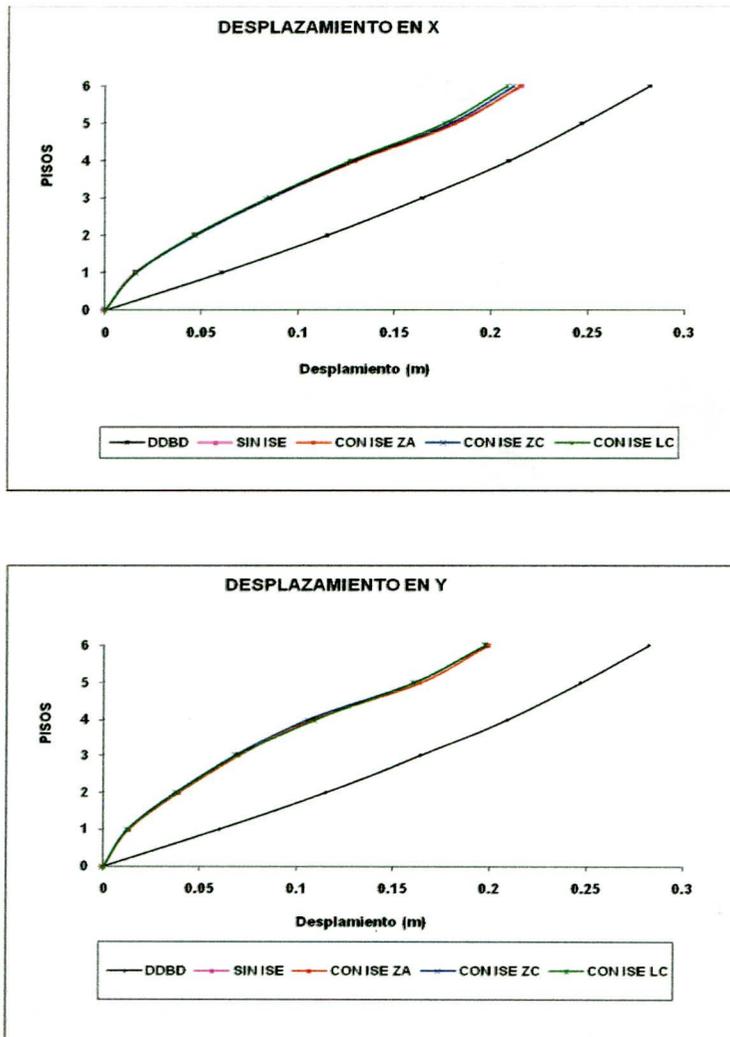


Fig. 3.8 Perfil de Desplazamientos

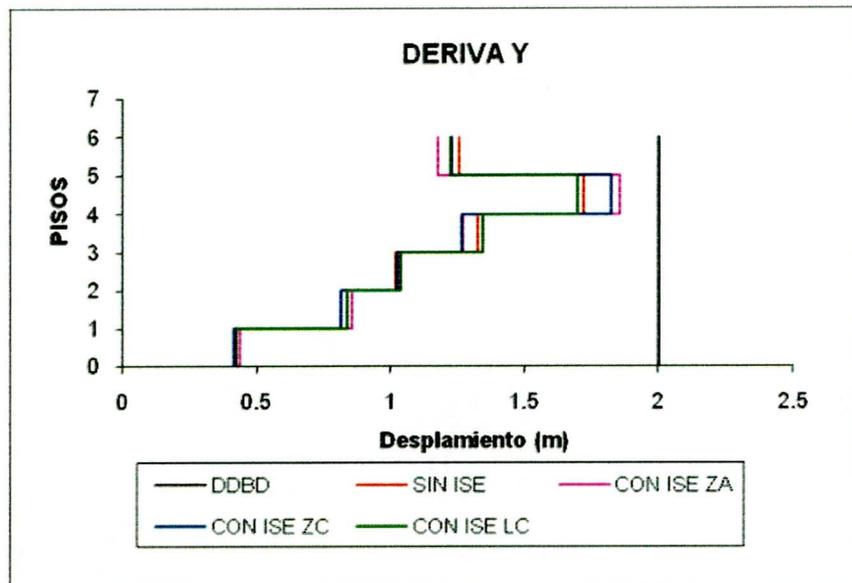
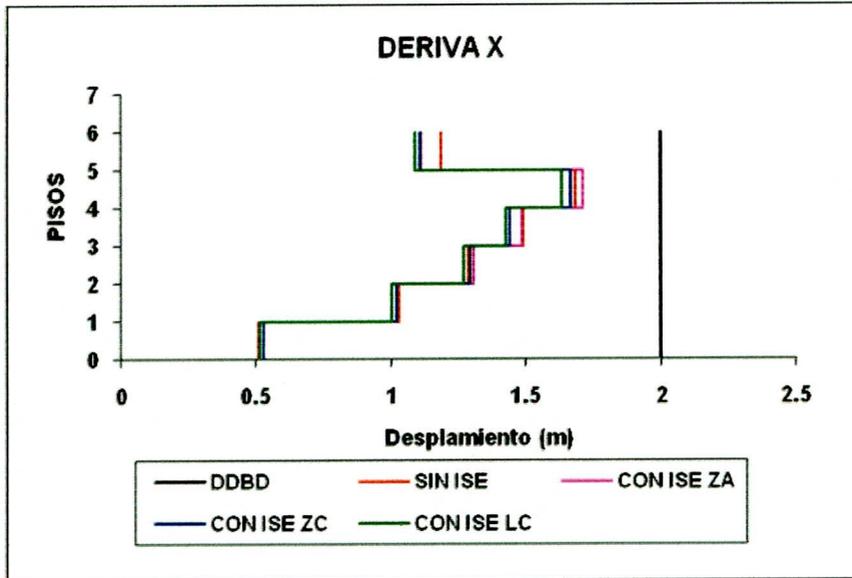


Fig. 3.9 Perfil de Derivas.

Para las conclusiones podemos indicar unas tablas en la que revela la variación que existe de las derivas de piso en tanto por ciento, tomando como referencia a la estructura que no esta influenciada por este fenómeno.

VARIACIÓN DE DERIVAS EN SENTIDO X (%)			
SIN ISE	CON ISE EN ZA	CON ISE EN ZC	CON ISE EN LC
0	1.00	3.89	1.10
0	1.00	3.89	1.10
0	-0.54	-0.89	-2.76
0	-0.54	-0.89	-2.76
0	1.57	0.29	-1.46
0	1.57	0.29	-1.46
0	-0.22	-3.51	-4.36
0	-0.22	-3.51	-4.36
0	1.71	-1.03	-2.96
0	1.71	-1.03	-2.96
0	-6.34	-6.73	-8.05
0	-6.34	-6.73	-8.05

Tabla 3.15 Variación de derivas para el edificio que esta influenciada por la ISE en sentido X, si tiene signo (-) equivale a una reducción de derivas y cuando es (+) indica un amento de deriva

VARIACIÓN DE LAS DERIVAS (%)			
SIN ISE	CON ISE EN ZA	CON ISE EN ZC	CON ISE EN LC
0	2.82	-2.46	-0.58
0	2.82	-2.46	-0.58
0	1.63	-2.99	-0.38
0	1.63	-2.99	-0.38
0	1.02	0.32	1.69
0	1.02	0.32	1.69
0	-4.28	-4.75	1.44
0	-4.28	-4.75	1.44
0	7.74	5.84	-1.28
0	7.74	5.84	-1.28
0	-6.12	-2.06	-2.61
0	-6.12	-2.06	-2.61

Tabla 3.16 Variación de derivas para el edificio que esta influenciada por la ISE en sentido Y, si tiene signo (-) equivale a una reducción de derivas y cuando es (+) indica un amento de deriva

CAPÍTULO

IV

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.

De acuerdo a los resultados obtenidos luego de influenciar a la edificación por la interacción suelo estructura en la cimentación modificando su rigidez por medio de resortes lineales y helicoidales que simulan la rigidez del suelo colindante, los cuales se encuentran en serie con la rigidez de la estructura y mediante el análisis inelástico de historia en el tiempo, que muestra el comportamiento real de la estructura que previamente fue influenciada por la ISE, podemos concluir que:

- La interacción se produce debido a la presencia de un elemento extraño para el suelo (cimentación) modificando de esta forma el movimiento en campo libre por la generación de ondas difractadas, la cual transmite sus efectos a la estructura
- Debido a la interacción cinemática que existe entre la estructura y el suelo de fundación mostrada en la investigación, podemos decir principalmente que existen una disminución en el desplazamiento de fluencia, aumento en la ductilidad y amortiguamiento efectivo y con ello aumento en el período de vibración natural de la estructura en cimentaciones flexibles que se da en suelos blandos.
- Al estar la estructura cimentada en el suelo y por la consideración según FEMA 440 que la rigidez del suelo actúa en serie con la de la estructura, podemos ver que la rigidez del sistema disminuye en un 6.02% cuando se diseña con zapata aislada, 4.09% con zapata corrida y 3.07% con losa de cimentación; lo cual reduce considerablemente la respuesta estructural en



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

CAPITULO IV

edificios con zapatas aisladas y en losas de cimentación es muy poco su afectación; esto indica que si es de considerar los efectos de interacción inercial.

- Aunque se reduce las cuantías de acero, ello no equivale a decir que las derivas van ha cumplir con lo dispuesto en los Códigos de diseño, pues podemos apreciar en los resultados del ANLHT desarrollado en el Opensees que las derivas en sentido X aumentan hasta en un 3.89% cuando tenemos una zapata aislada en su cimentación, mientras que en sentido Y cuando se diseña con zapata aislada alcanzan una variación de 7.74%;
- Estos efectos no pueden ser considerados en forma general como desfavorables o favorable a la respuesta estructural, pues en el ultimo nivel del edificio estudiado las derivas disminuyen hasta en un 8.05% en sentido x, cuando se diseña con una losa de cimentación; es por ello que su consideración merece un tratamiento especial durante la etapa de diseño sísmico
- Para evaluar el desempeño de la estructura es una excelente herramienta el ANLHT, el cual nos mostro el análisis de un sistema inelástico influenciada previamente por la ISE, con lo cual se concluyo la importancia de la consideración de la interacción en el diseño sísmico de estructuras.
- Se ha planteado un procedimiento sencillo y de fácil aplicación con ecuaciones que tienen en cuenta la el semi espacio del suelo y la estructura a la vez, pues estos dos componentes son las que intervienen en el estudio de los efectos de ISE.



4.2 Recomendaciones

- Se debe conocer la estratigrafía del suelo donde va a ser implantada la estructura, así como también la velocidad de onda de corte, la profundidad de empotramiento, etc., pues de ella depende la determinación de su rigidez, los cuales reemplazarán al suelo y modificarán la rigidez del sistema.
- Al escalar los sismos al espectro de diseño, se debe prestar especial cuidado en sus resultados y se debe rechazar a los registros sísmicos que no se aproximen al espectro a utilizar, pues el ANLHT evalúa el comportamiento real de la estructura en función de estos registros, proporcionando valores de desplazamiento.
- Los resultados obtenidos en este trabajo investigativo son satisfactorios pero no lo suficientes para que las ecuaciones aquí presentadas estén debidamente justificadas. Se recomienda que esta investigación sea profundizada para el mejor entendimiento de estos efectos en sistemas no lineales, además de la utilización de otros métodos de verificación.
- Adicionalmente, es importante estudiar el modelaje de la estructura con interacción considerando la profundidad de desplante, para evaluar de mejor forma los resortes y amortiguadores usando directamente el programa Opensees y compararlos con los resultados presentados en esta investigación.
- Debido a que los códigos actuales no consideran la Interacción Suelo Estructura, los resultados obtenidos en esta investigación pueden servir de base para la formulación de criterios de diseño sísmico de edificios apoyados flexiblemente.



Referencias.

- [1] Canavesio Oscar, Ambrosini Ricardo, Nataline Mario. Interacción suelo estructura en puentes. Facultad de Ingeniería - UNNE e Instituto de Estructuras, Argentina.
- [2] Caraguay Verónica, Implementación del DDBD en estructura con irregularidad en planta, Tesis (2008), Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- [3] Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, “Capítulo 1: Peligro Sísmico, espectros de diseño y requisitos de cálculo para diseño sismo resistente”, Quito- Ecuador.
- [4] Coduto, Donald P. 2001. Foundation Design. Prentice - Hall Inc. Segunda Edición.
- [5] FEMA 356, Prestandard And Commentary for the Seismic Rehabilitation of buildings. Prepared by ASCE-Reston, Virginia and FEMA-Washington, D.C. November 2000.
- [6] FEMA 440, Improvement of Nolinear Static Seismic Analysis Procedures (2005).
- [7] Kramer, S.L. (1996) Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [8] Montejo Luis. (2004), “Generation and analysis of spectrum compatible earthquake time histories using wavelets”. Ms Thesis, University of Puerto Rico.
- [9] Opensees, Programa de código libre desarrollado por PEER en la Universidad de California en Berkeley.
- [10] Priestley, Calvi and Kowalsky (2007), Displacement-Based Seismic Design of Structures, IUSS Press, Pavia –Italia.
- [11] Soriano A, Ing., Interacción suelo-estructura. Modificación del movimiento, ISSN 0214-4557, N° 1, 1989, pags. 287-308.



“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES DE EDIFICACIONES”

AUTOR: STALIN A. ANGAMARCA MOROCHO

- [12] Tandazo O. Eddie y Vinicio Suárez Ch. “Importancia del estudio de Interacción Suelo Estructura en el diseño de edificaciones” /// Conferencia Ecuatoriana de Ingeniería Sísmica” UTPL, 2007
- [13] Veletsos A. S. and J. W. Meek,(1974) “Dynamic behavior of building-foundation systems”, J. Earthquake Engrg. Struct. Dynamics. Vol. 3, No. 2. pp 121-138.
- [14] Yussy C, Ing., Interacción dinámica suelo – estructura en la ciudad de Armenia.

ANEXOS

