

CAPITULO IV

ANÁLISIS SÍSMICO DE APOYOS INTERIORES DEL PUENTE DE BAHÍA DE CARÁQUEZ ANTE UN SISMO LEJANO Y OTRO IMPULSIVO

4.1 Introducción

En este capítulo se analizará el tramo transversal la infraestructura de un grupo de pilotes del tramo central del puente de Bahía de Caráquez – San Vicente que se está construyendo actualmente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército y sus características están especificadas en el capítulo 1. Se analizará la pila P20 que tiene una longitud de 45 metros aproximadamente.



Figura 4. 1: Elementos que conforman los apoyos del puente.

En la figura 4.1 se muestran los pilotes, columnas y vigas de uno de los apoyos intermedios del puente el cual va a ser analizado en este capítulo. Sobre las vigas superiores se colocarán aisladores de base tipo péndulo de fricción FPS (Frictional Pendulum System) y finalmente se colocarán las vigas superiores y el tablero del puente. El objetivo es analizar el comportamiento de la estructura indicada en la figura 4.1 con los aisladores, ante los dos sismos indicados. A diferencia del capítulo anterior el análisis de esta estructura incluirá también la zapata, dos pilas y viga cabezal de la infraestructura del puente.

4.2 Modelo de Análisis de los Aisladores

El aislamiento sísmico separa mediante un cuerpo flexible las pilas de la estructura, con el aislamiento sísmico se modifican las características dinámicas de una estructura, reduciendo así la demanda sísmica. Para el diseño de los aisladores FPS se ha modelado de una manera aproximada con resortes que restringen los desplazamientos de los grados de libertad horizontales, del sitio en el que actúan. En la figura 4.2 se muestra en la parte superior del modelo dos resortes que representan a los dos aisladores colocados en los extremos.

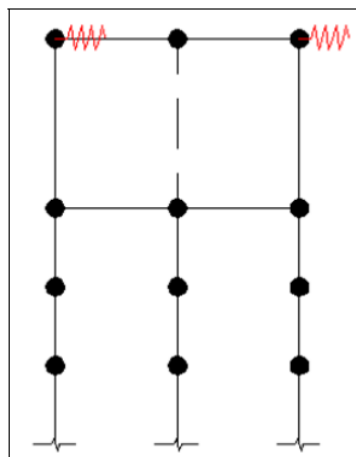


Figura 4.2: Modelo de análisis para los aisladores FPS.

El FPS consiste en un deslizador que se mueve sobre una superficie esférica cóncava. Cualquier movimiento de la base producirá un desplazamiento del deslizador a lo largo de esta superficie disipando energía por fricción. En la figura 4.3, en la parte izquierda se aprecia los dos aisladores colocados en el apoyo del puente y en la parte derecha de la figura 4.3 se pretende indicar que durante un sismo, el deslizador del FPS es el que se mueve, el peso que se encuentra sobre el aislador es el que impide el movimiento, con fuerzas de fricción en los puntos de contacto del deslizador, que actúan en sentido contrario al movimiento.

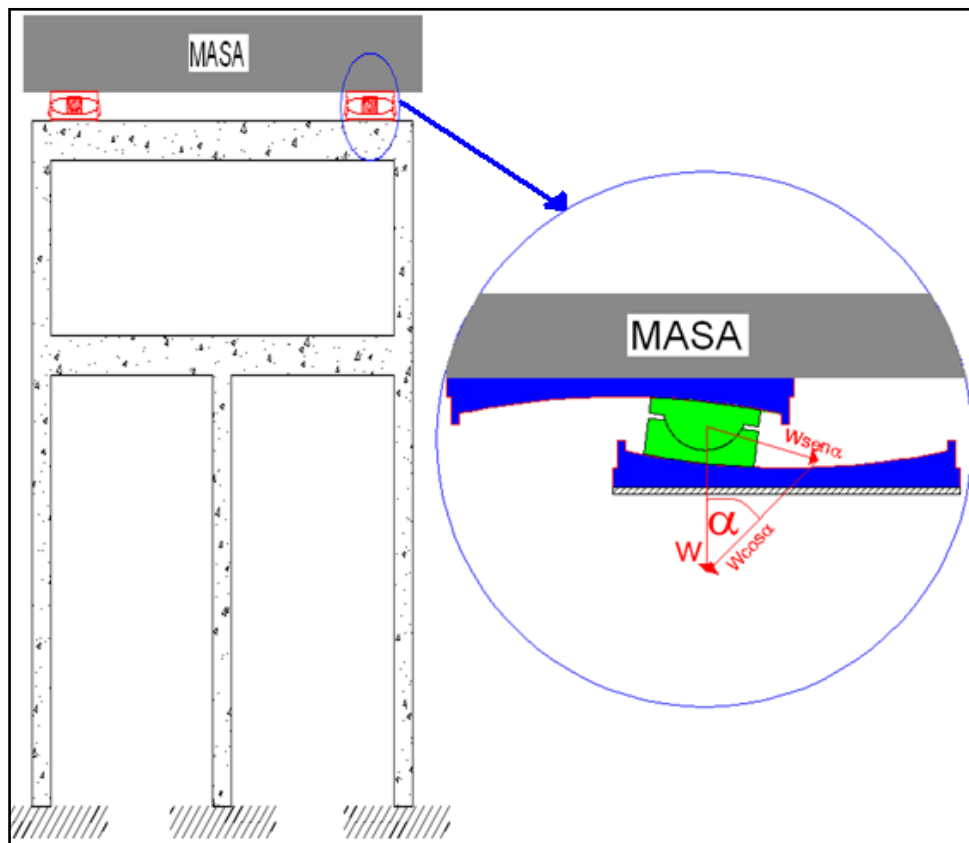


Figura 4. 3: Modelo con aisladores FPS.

En la figura 4.4 se muestra el comportamiento de la curva de histéresis del FPS, que se ha construido aplicando fuerza vW en el sentido positivo creando un desplazamiento

q_y el cual llega al límite elástico del aislador, se continua con la fuerza hasta alcanzar el punto de máxima deformación q , del aislador y luego se disminuye la fuerza aplicada poco a poco y por ende la deformación hasta llegar a la fuerza igual a cero y en ese punto se muestra en la gráfica que la deformación es diferente a cero, luego se muestra el cambio del sentido de la fuerza aplicada a negativa $F(-)$, para obtener deformaciones negativas hasta llegar a la máxima deformación negativa, luego nuevamente se descarga la fuerza hasta llegar a $F=0$ y por último se aplica de nuevo la fuerza positiva hasta llegar a cerrar la curva.

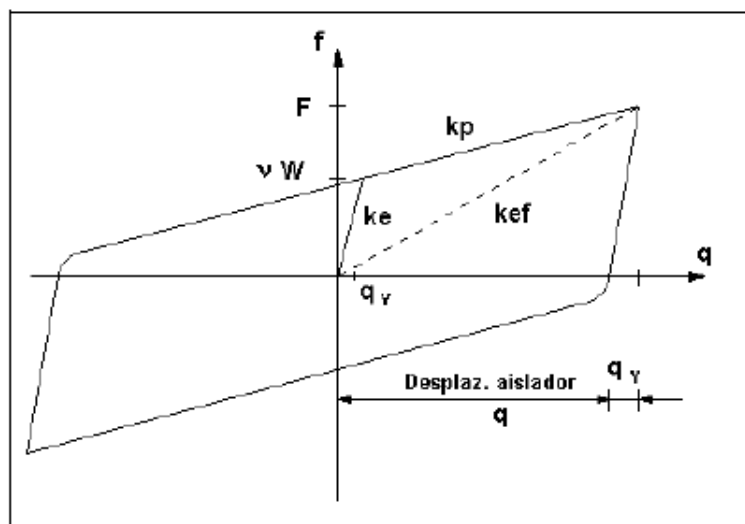


Figura 4. 4: Comportamiento de histéresis de un aislador FPS

La aislación sísmica modifica las propiedades dinámicas de rigidez, con la curva de histéresis se puede calcular la rigidez elástica k_e ; la rigidez en el rango plástico k_p y la rigidez efectiva k_{ef} , como se puede mostrar a continuación las siguientes ecuaciones. Aguiar et al. (2008).

$$k_e = \frac{vW}{q_y} \quad (4.1)$$

$$k_p = \frac{W}{R} \quad (4.2)$$

$$k_{ef} = \frac{vW + \frac{W}{R}q}{q} \quad (4.3)$$

Donde v es el coeficiente de Poisson; W el peso sobre el aislador; q_y el desplazamiento a nivel de fluencia del aislador; R es el radio de curvatura del aislador; q el desplazamiento asociado a la rigidez efectiva. Si se trabaja con la rigidez efectiva el análisis se lo realiza en forma interactiva.

De igual manera el factor de amortiguamiento efectivo ε_{ef} se obtiene con la siguiente expresión.

$$\varepsilon_{ef} = \frac{W_D}{4\pi W_E} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{v}{v + \frac{q}{R}} \right] \quad (4.4)$$

Siendo W_D , W_E la energía disipada en el rango inelástico y elástico respectivamente.

Nótese que también es función del desplazamiento, luego el cálculo es interactivo.

4.3 Tipo de Suelo

La estratigrafía de Bahía consta de varias capas de suelo como se describe a continuación: A una profundidad de 3 metros existe una capa de sedimentos con un espesor de 1 metro aproximadamente, a una profundidad de 13 metros hay un estrato de Arena Licuable color gris de consistencia blanda con un número de golpes < 30 (SPT), subyacente a esta capa has una profundidad de 28 metros se tiene arena no licuable de consistencia media con un numero de golpes < 30 (SPT), continuando con la

estratigrafía se tiene hasta una profundidad de 35 metros una capa de Limo de baja compresibilidad color café, por último se tiene una capa de Limo de alta compresibilidad, esta llega hasta una profundidad de 55 metros con un nudo de golpes resistentes de 50 a 120 (SPT), en algunos tramos también se encuentra Arcilla plástica, por último a una profundidad de 60 metros se tiene Lutita de consistencia muy dura con una resistencia de 200 (SPT).

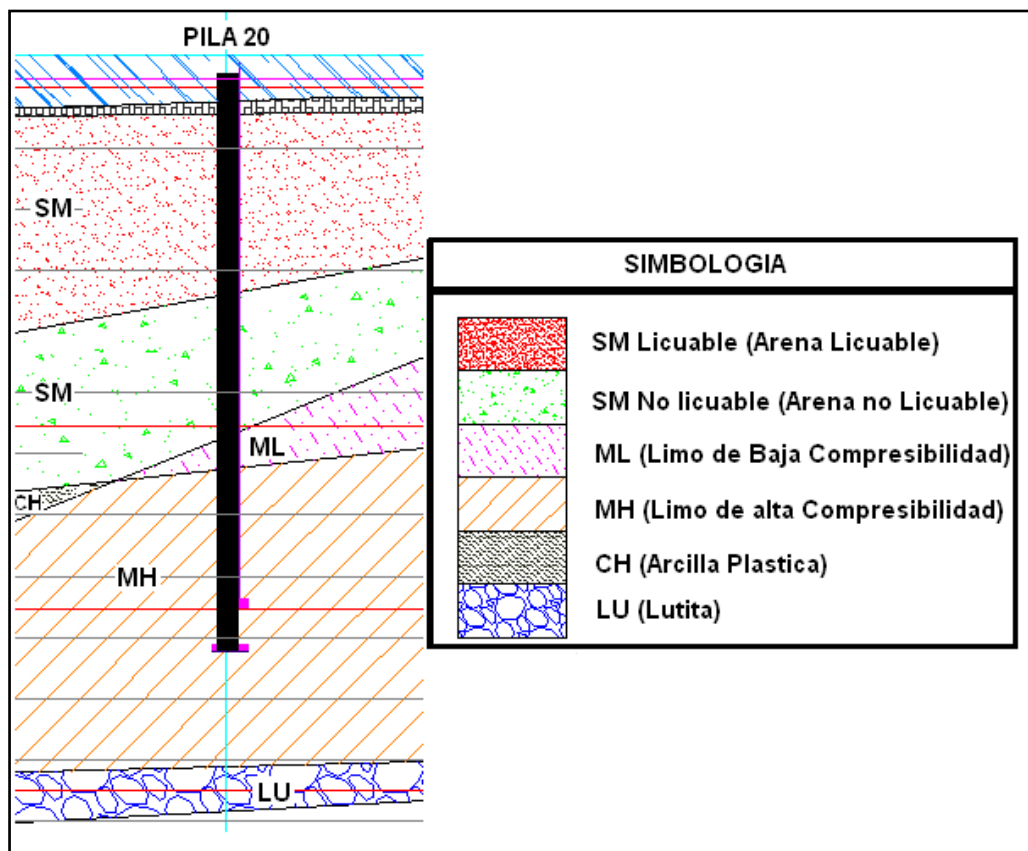


Figura 4.5: Estratigrafía de la Pila 20 del tramo central

4.3.1 Curva carga deformación del suelo

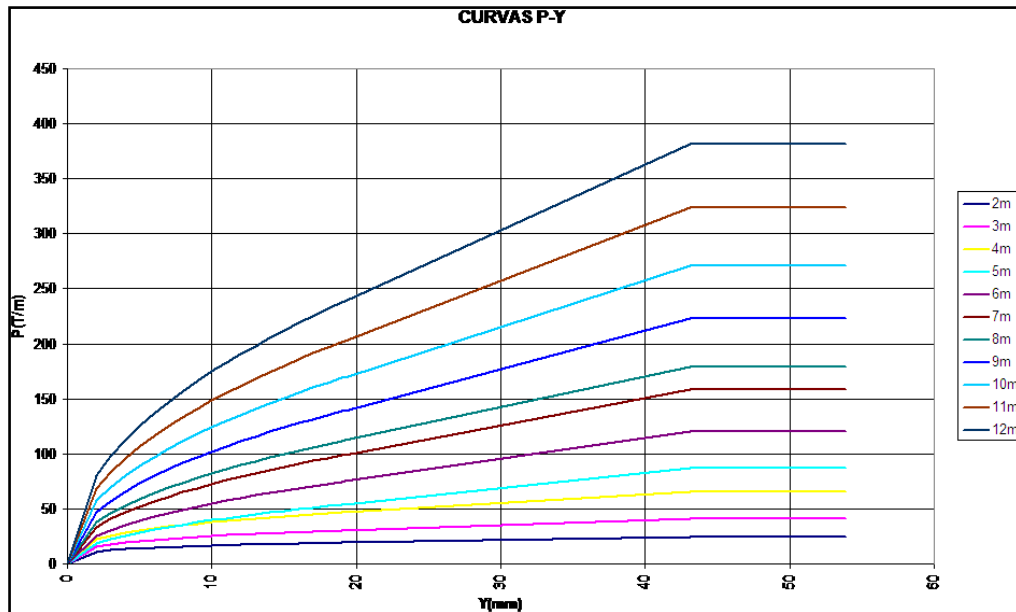


Figura 4.6: Curva carga deformación del suelo.

Como se muestra en el capítulo II la figura 4.6 se muestra la curva carga-deformación del suelo, para el apoyo que se está analizando. Beltrán (2009), Romo (2009). A medida que se incrementa la profundidad del suelo, la resistencia sube; en consecuencia la curva inferior corresponde a los 2 m., de profundidad y la superior a los 12 m., de profundidad.

A partir de la figura 4.6 se puede hallar un modelo trilineal o bilineal para definir el comportamiento no lineal del suelo, se ha decidido trabajar con un modelo elasto perfectamente plástico, trabajando para el efecto con la rigidez secante; en la figura 4.3 se muestra el modelo, con el cual se trabaja, encontrado a partir de la figura 4.7.

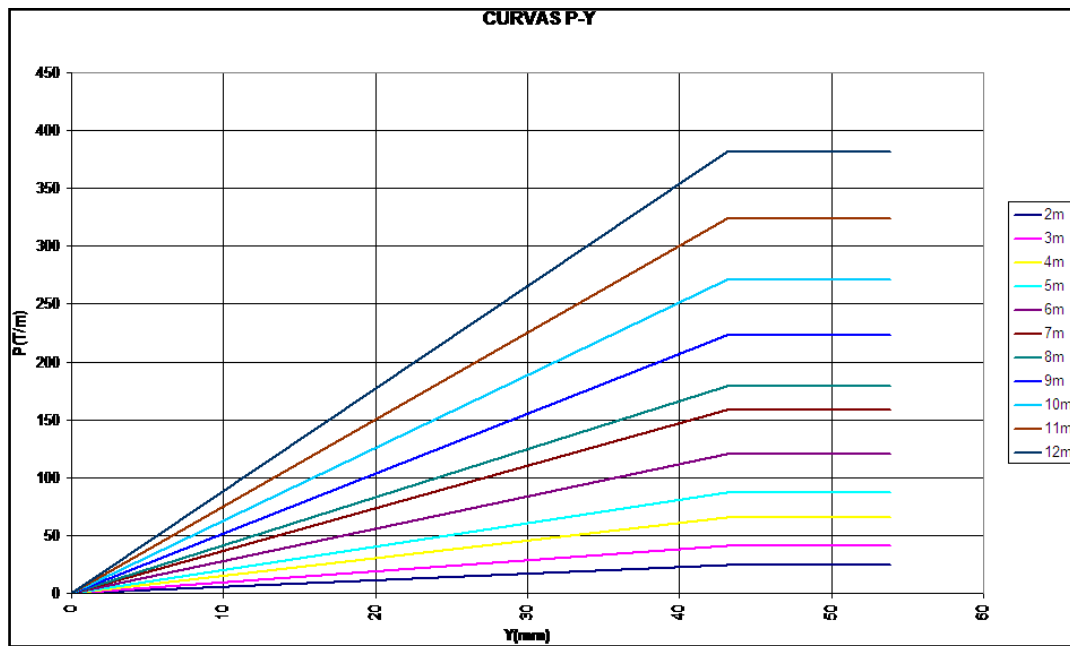


Figura 4. 7: Modelo Bilineal de la curva carga deformación del suelo.

El lecho del río se encuentra a los 9 m., de profundidad. Si el pilote tiene 45 m., de altura, se encuentra bajo el suelo 36 m. Pero la curva carga-deformación entregada por el especialista en suelos llega hasta los 12 m. En el análisis se va a considerar que la curva carga deformación del suelo para los 12 m., de profundidad es igual hasta el inicio del pilote. La incidencia de esta hipótesis no es importante en el análisis sísmico.

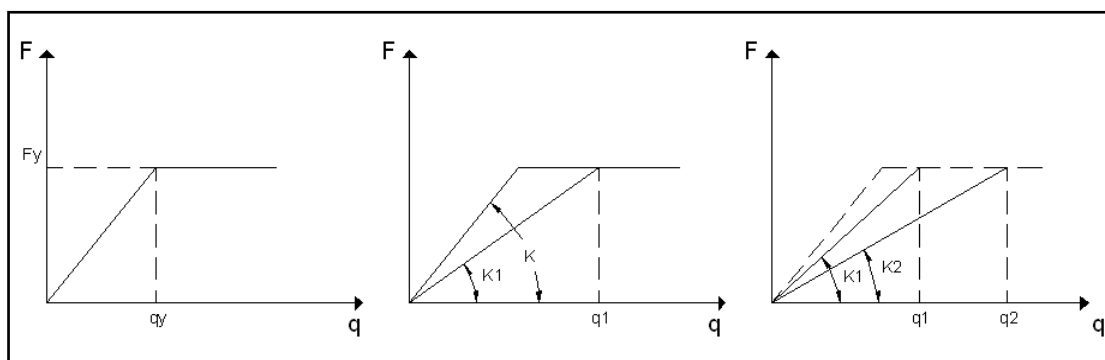


Figura 4. 8: Comportamiento no lineal del suelo. Esquema de cálculo.

En el capítulo anterior se mostró a detalle que cuando el suelo trabaja en el rango elástico con desplazamientos menores a q_y figura 4.8 izquierda se tiene una rigidez constante igual a K como se muestra en el centro de la figura 4.8, y cuando el suelo trabaja en el rango inelástico con desplazamientos mayores a q_y la rigidez del suelo es variable como se muestra en la figura 4.8 derecha; para el cálculo de el tramo central del puente de Bahía de Caraquez se utilizará un análisis no lineal del suelo.

4.4 Geometría de la Estructura

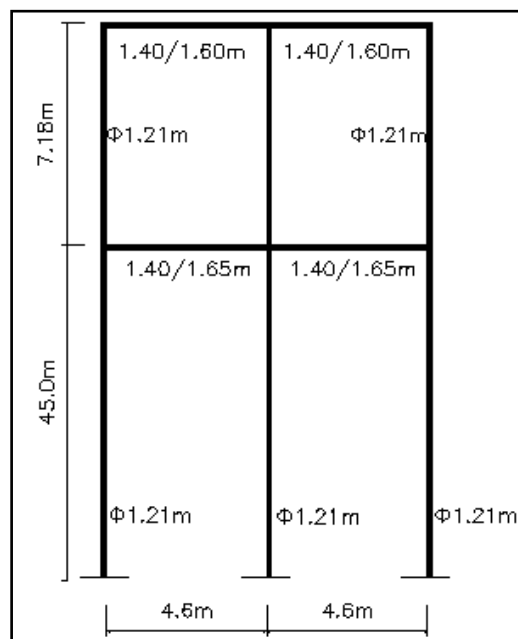


Figura 4. 9: Geometría de la estructura de apoyo.

En la figura 4.9 se muestra la geometría de la infraestructura analizada, se ve que la luz entre pilotes es de 4.6 m.; la altura del pilote es de 45 m.y la altura de las columnas o pilas es de 7.18 m. Se aprecia también las dimensiones de la zapata, viga cabezal y el diámetro de los pilotes. El hormigón utilizado tiene una resistencia a la compresión de 350 kg/cm^2 .

Se consideró 15 elementos finitos en cada uno de los pilotes, de tal manera que la longitud de cada elemento es de 3.0 m. Se está trabajando con elementos finitos de masa uniforme distribuida tipo barra.

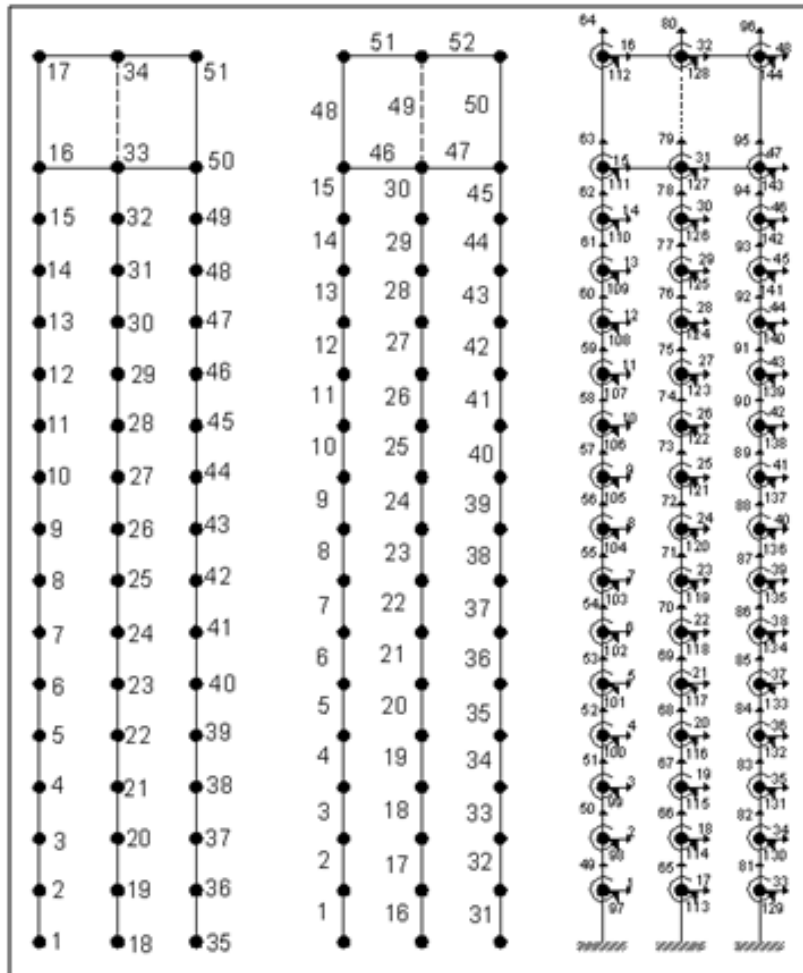


Figura 4. 10: Numeración de nudos, elementos y grados de libertad.

En la figura 4.10 se muestra a la izquierda, la numeración de nudos los cuales en total son 51 nudos en los 16 son para cada pilote; en la parte central de la figura 4.10 se tiene la numeración de los elementos los cuales son 52 en total, el elemento 49 no existe pero por razones del programa CEINCI-LAB que se utiliza para analizar los apoyos es necesario numerarlo y a la derecha se tiene los grados de libertad. Se han considerado tres grados de libertad por nudo, dos desplazamientos y una rotación. Aguiar (2004). Se tienen 144 grados de libertad. En consecuencia la matriz de rigidez y de masa, iniciales



son de 144 por 144. Luego se condensan estas matrices a los grados de libertad horizontales. Las matrices de rigidez y de masa con las cuales se realiza el análisis sísmico son de 48 por 48.

La matriz de amortiguamiento también es de 48 por 48. Se consideró el algoritmo de Wilson y Penzien para encontrar la matriz de amortiguamiento. Finalmente, la respuesta dinámica se la encontró empleando el método denominado: Procedimiento de Espacio de Estado. Aguiar (2007, 2008).

4.5 Sismos de Análisis

En la figura 4.11, se indica los acelerogramas de los dos sismos de análisis utilizados, a la izquierda se tiene el sismo de El Centro de 1940 el cual se ha venido utilizando en los anteriores capítulos, que tiene una aceleración máxima del suelo de 0.3 g.; siendo g., la aceleración de la gravedad y a la derecha el registro de New Hall de 1994 ocurrido en los Ángeles, California y una magnitud de 6.7, pero lo que hizo especial a este sismo fue la aceleración máxima del suelo que fue ligeramente menor a 0,6 g; una de las más altas registradas en Estados Unidos, es ahí porque este sismo es considerado impulsivo.

En el sismo de El Centro las aceleraciones se mantienen altas, durante unos 25 segundos; en cambio en el sismo de New Hall las aceleraciones se mantienen altas durante unos 5 segundos. Los sismos impulsivos son de corta duración pero la energía que transmiten a las estructuras es muy alta, lo que les hace muy destructivos, como se puede observar en el acelerograma de la figura 4.11 el sismo de New Hall le duplica la aceleración al sismo del Centro.

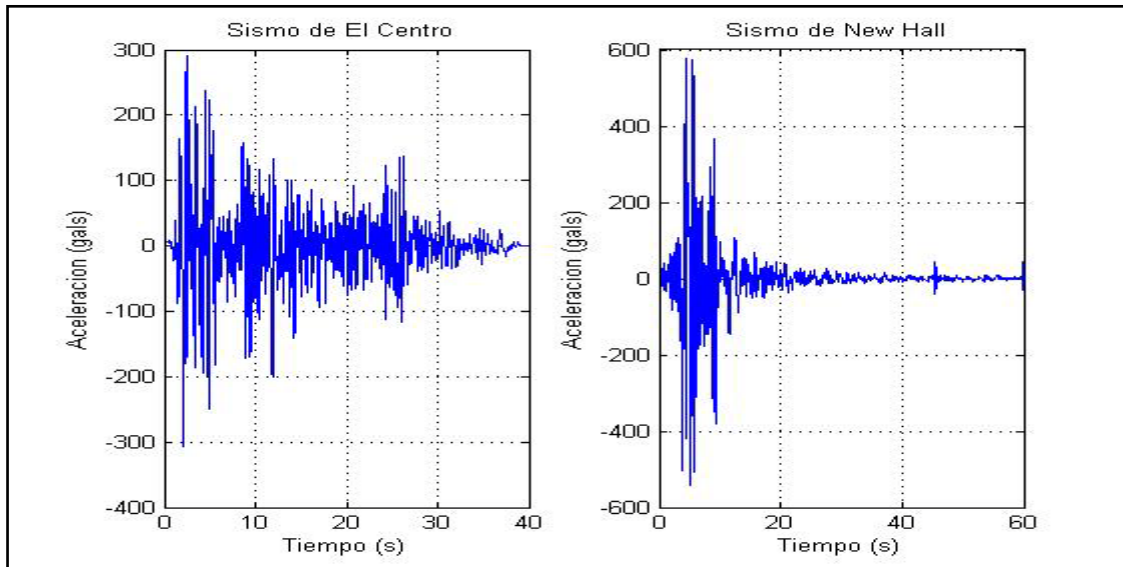


Figura 4. 11: Acelerogramas de los sismos de análisis.

En la figura 4.12 se muestran los respectivos espectros de respuesta elástica. Nótese que las ordenadas espectrales del sismo de New Hall están entre 2.5 y 3 veces las ordenadas espectrales del sismo de El Centro. Luego las fuerzas que suministra el sismo impulsivo son mucho más altas.

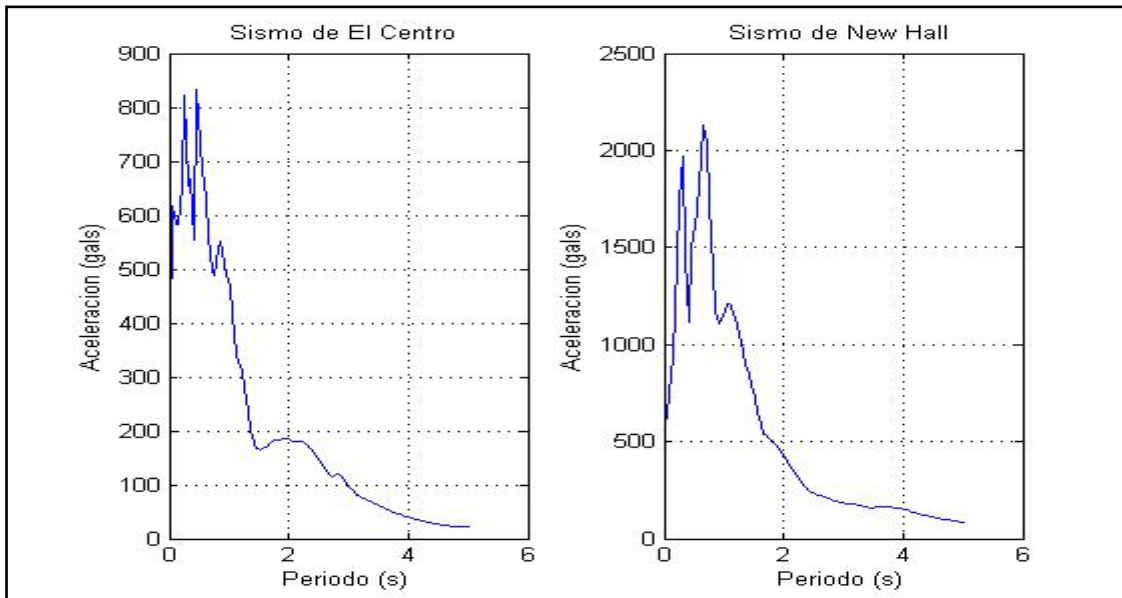


Figura 4. 12: Espectros de respuesta elástica.

4.6 Resultados

En la figura 4.13 se indican los grados de libertad más relevantes de la estructura, los grados de libertad donde se va a presentar la historia en el tiempo de los desplazamientos horizontales y de las fuerzas horizontales son los que se encuentran en color rojo en la figura 4.13 los cuales son 1, 12, 15 y 16. El grado de libertad 16 corresponde al desplazamiento en el tope sobre la columna izquierda; el grado de libertad 15 es la componente de desplazamiento de la viga intermedia o zapata del apoyo, el grado de libertad 1 esta al inicio del pilote y el grado de libertad 12 en la parte superior del pilote donde comienza el estrato de suelo.

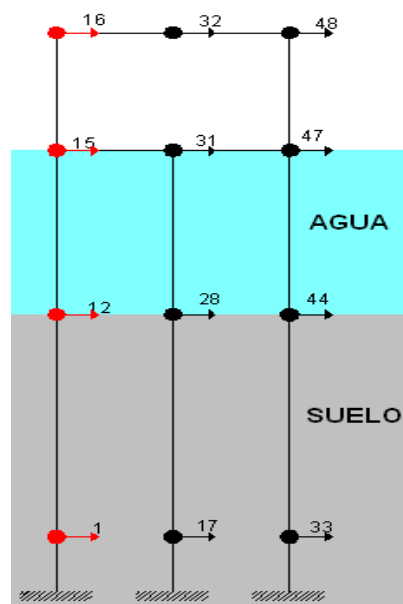


Figura 4. 13: Grados de libertad.

La respuesta de desplazamientos, se presenta en la figura 4.14 para el sismo de El Centro y en la figura 4.15 para el sismo de New Hall; en los dos casos se consideró comportamiento no lineal del suelo. Los desplazamientos laterales de la figura 4.14, en el grado de libertad 1, están multiplicados por 10^{-4} de tal manera que son muy bajos ya que ese es el sector donde el pilote esta básicamente empotrado. Ante el sismo de El

Centro, los desplazamientos laterales máximos están alrededor de los 8 cm; En cambio ante el sismo impulsivo están en el orden de los 12 cm.

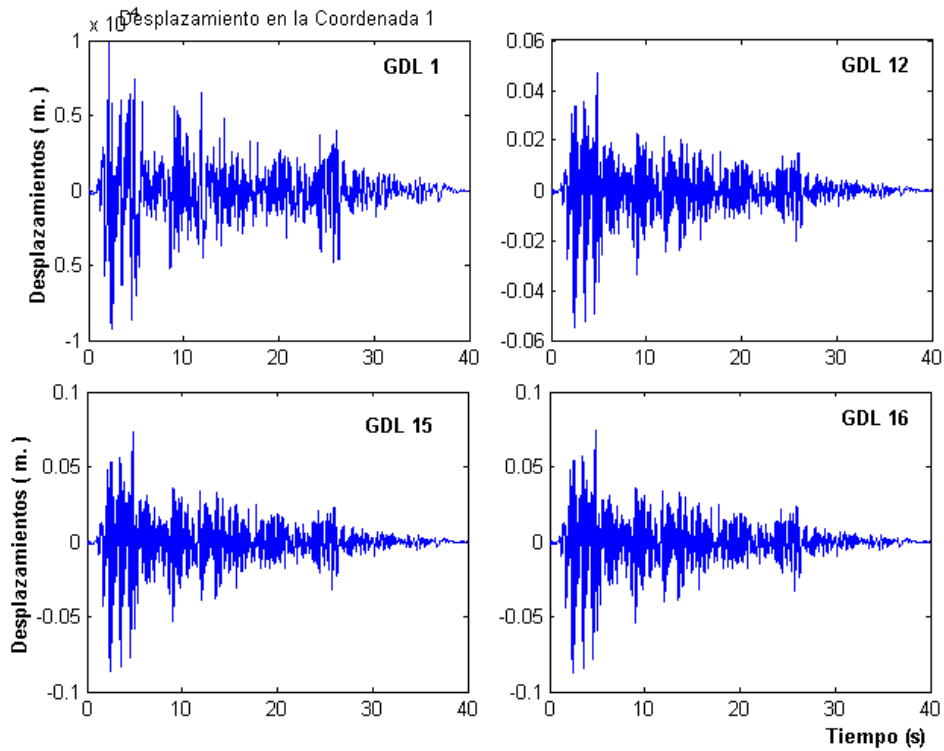


Figura 4. 14: Respuesta de desplazamientos. Sismo de El Centro.

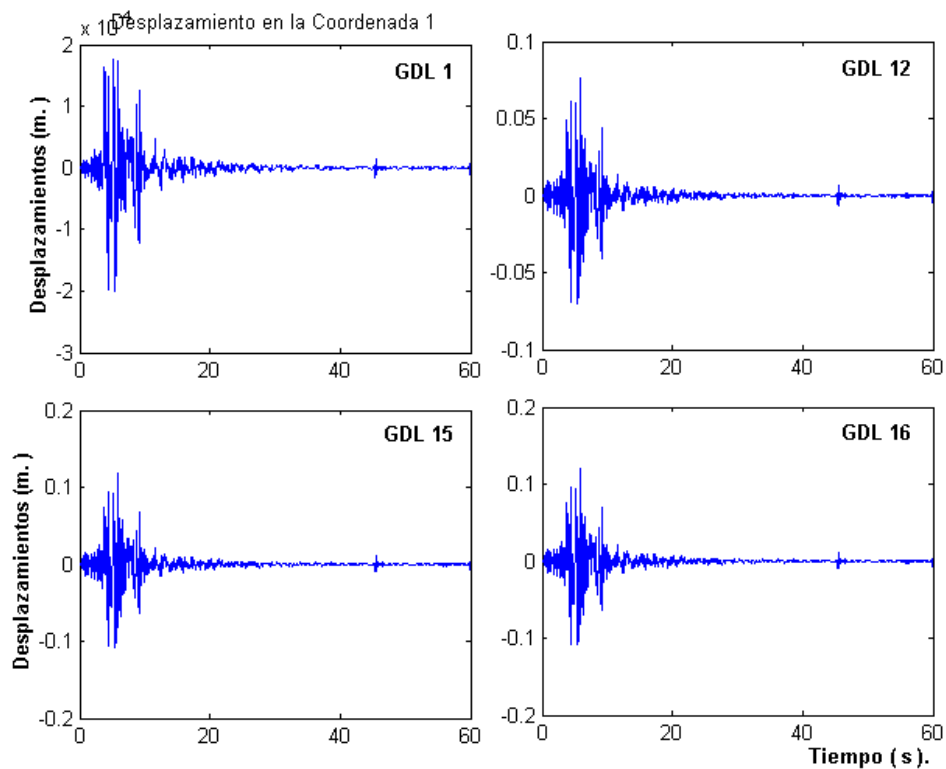


Figura 4. 15: Respuesta de desplazamientos. Sismo de New Hall.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las fuerzas horizontales que actúan en los grados de libertad seleccionados, ante los sismos de El Centro y New Hall, respectivamente.

Las fuerzas horizontales que actúan ante el sismo de El Centro tienen una reacción similar a los desplazamientos laterales, con su fuerza máxima que actúan en la parte superior o sea en la viga cabezal que es aproximadamente de 9 t. En el sismo de New Hall su fuerza máxima que actúa en la parte superior es aproximadamente de 14 t.

Se aprecia que ante el sismo impulsivo los desplazamientos laterales y fuerzas horizontales en el instante del pulso más grande se ingresan desplazamientos y fuerzas muy altos en todos los grados de libertad. Después de esto se reducen las fuerzas y desplazamientos notablemente. A diferencia del sismo de El Centro que tiene desplazamientos altos pero está repartida en toda la respuesta en el tiempo.

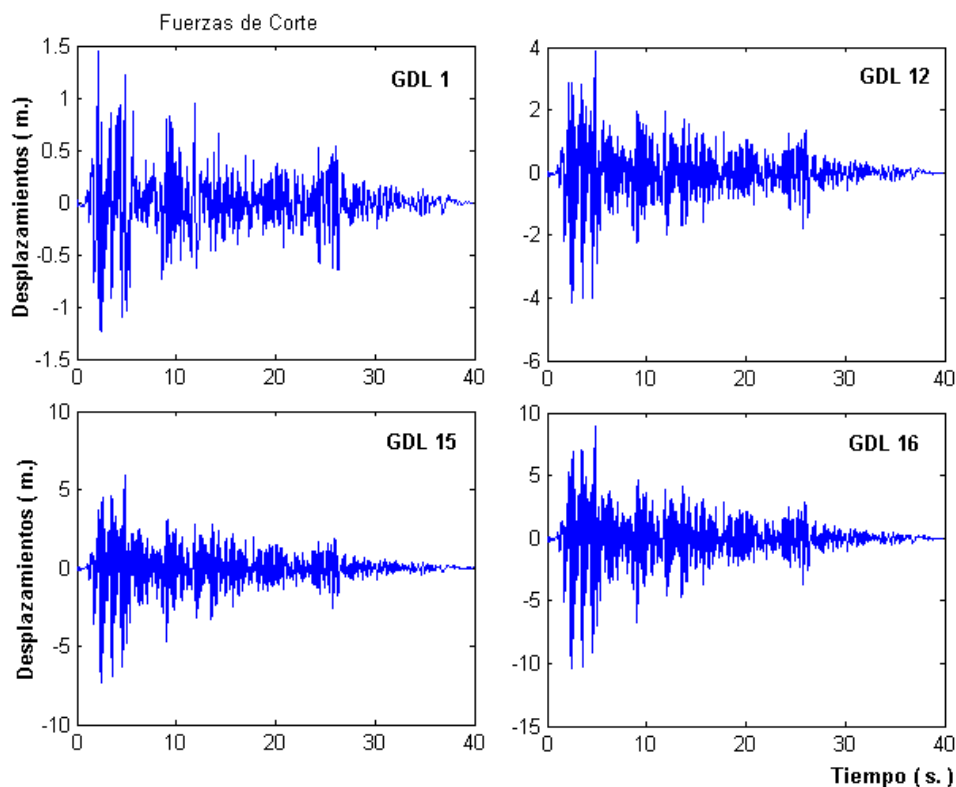


Figura 4. 16: Respuesta de fuerzas horizontales. *Sismo de El Centro.*

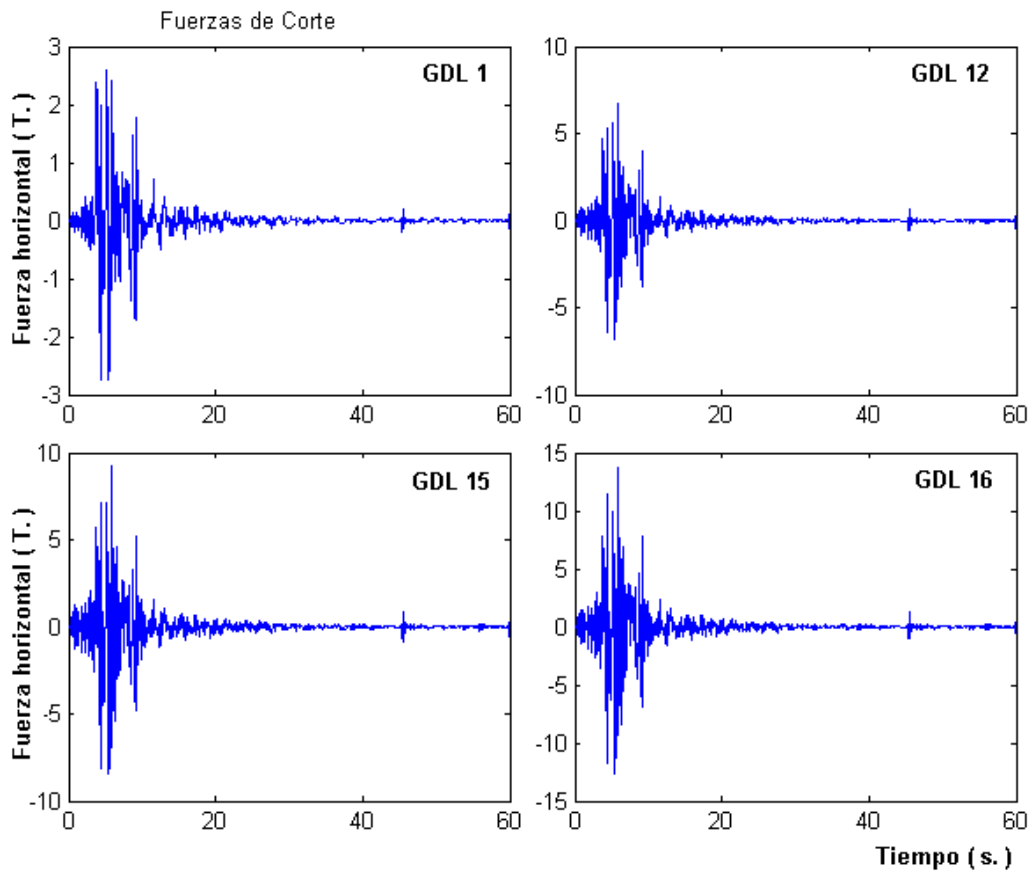


Figura 4. 17: Respuesta de fuerzas horizontales. *Sismo de New Hall.*

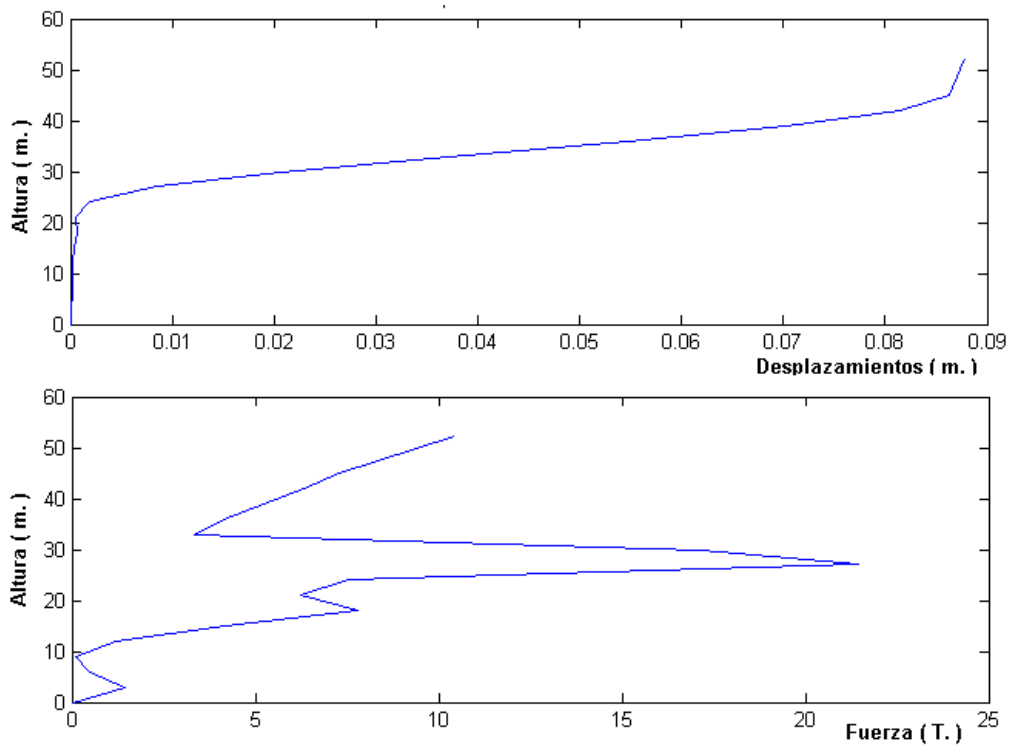


Figura 4. 18: Desplazamientos y fuerzas máximas. *Sismo de El Centro.*

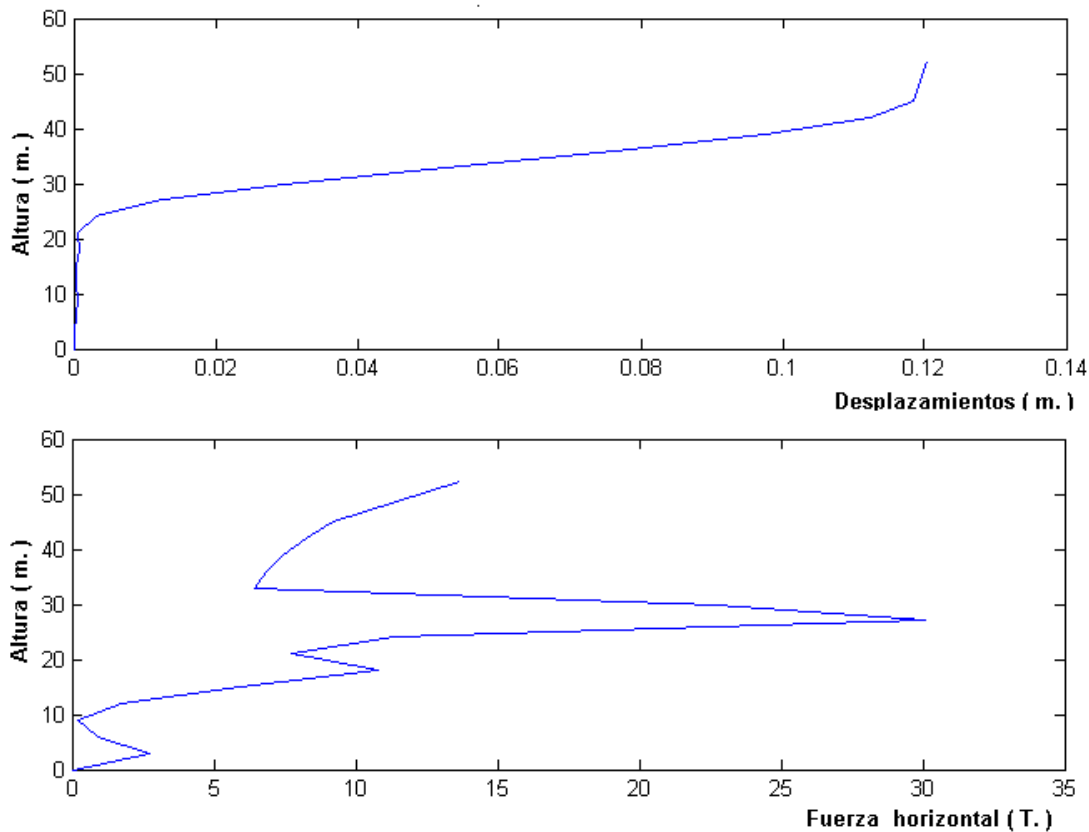


Figura 4. 19: Desplazamientos y fuerzas máximas. *Sismo de New Hall.*

En la parte superior de la figura 4.18 se presentan los desplazamientos en función de la altura del apoyo interior. Nótese que en los primeros 20 m., el suelo hace que el pilote esté prácticamente empotrado en el suelo, luego empieza a trabajar como un voladizo; de igual manera se aprecia que entre las dos vigas los desplazamientos horizontales disminuyen. En la gráfica inferior de la figura 4.18 se muestran las fuerzas horizontales, la máxima fuerza horizontal se produce en donde tiene un empotramiento el pilote en el suelo, su valor es de alrededor de 23 t. En la figura 4.18 se muestran los valores máximos de desplazamientos y fuerzas de corte versus la altura del apoyo, ante el sismo de New Hall. Esta curva es muy similar a la anterior pero con fuerzas de corte, mayores del orden de las 30 t.



4.7 Referencias

1. Aguiar R., (2004), “Análisis Matricial de Estructuras”, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Tercera Edición, 1 p, Quito.
2. Aguiar R., (2007), “Dinámica de Estructuras con MATLAB”, Centro de Investigaciones Científicas y Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha., 163 p. Quito.
3. Aguiar R., (2008), “Análisis Sísmico de Edificios”, Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, 41 p, Quito.
4. Aguiar R., Almazán J., Dechent P., Suárez V., (2008), Aisladores de base elastoméricos y FPS, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército., 292 p., Quito.
5. Beltrán, (2008) “Informe de Estudio de Suelos Bahía de Caráquez”, Cuerpo de Ingenieros del Ejército, Bahía de Caráquez.
6. Romo, (2009), “Rediseño Estructural del Puente Bahía – San Vicente”, Cuerpo de Ingenieros del Ejército, Bahía de Caráquez.