

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**RESPUESTA SÍSMICA DE TANQUES DE CONCRETO ARMADO PARA
ALMACENAMIENTO DE AGUA APOYADOS SOBRE UN SISTEMA DE
AISLACIÓN DEL TIPO PÉNDULO FRICCIONAL**

Tesis para optar el Grado de **Magíster en Ingeniería Civil**, que presenta:

Elvis Jony Mamani Yana

Asesor: VÍCTOR IVÁN FERNÁNDEZ- DÁVILA GONZALES, PhD.

Lima, marzo de 2017



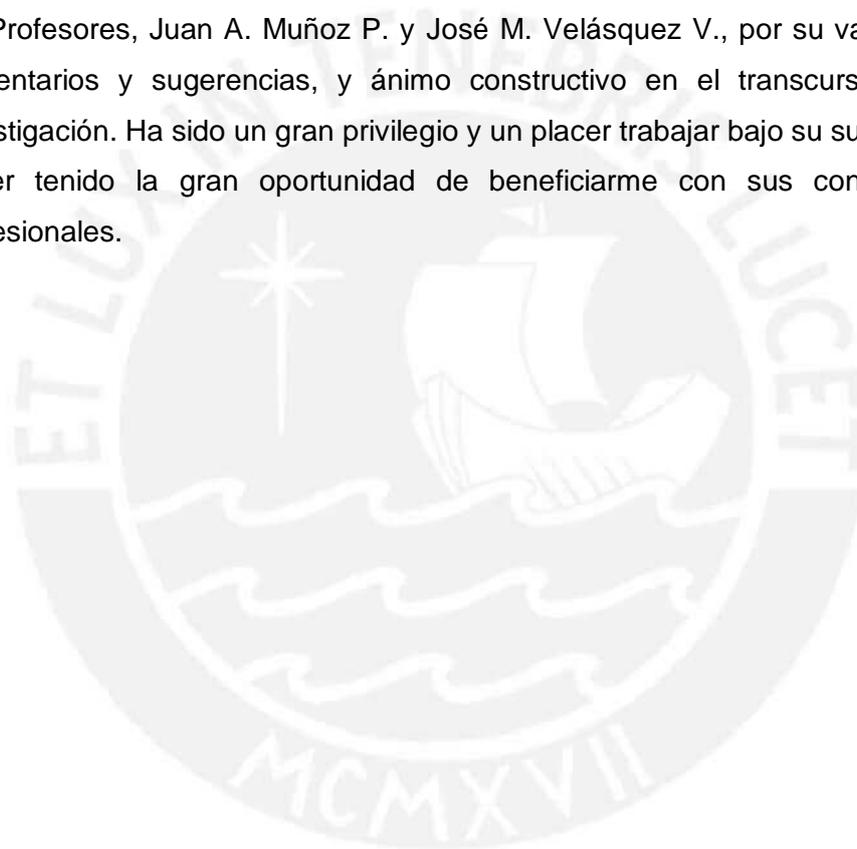


DEDICATORIA

A mis padres,
Eulogia Margarita, Yana Ilasaca y Fabian, Mamani Salamanca,
quienes fueron parte de mi formación personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar y sobre todo, agradezco a Dios Todopoderoso por concederme la capacidad de continuar con éxito. Gracias a la Sección de Ingeniería Civil de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú por el apoyo recibido en la presente investigación, al programa de investigación CONCYTEC 2015/2016 (convenio de gestión N° 27-2015-FONDECYT) por el financiamiento, y de manera particular a mi asesor de Tesis, Dr. Víctor I. Fernández-Dávila G., y a los Profesores, Juan A. Muñoz P. y José M. Velásquez V., por su valiosa guía, comentarios y sugerencias, y ánimo constructivo en el transcurso de esta investigación. Ha sido un gran privilegio y un placer trabajar bajo su supervisión y haber tenido la gran oportunidad de beneficiarme con sus conocimientos profesionales.



ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 5 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 6 |
| LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS Y VARIABLES | 9 |
| CAPÍTULO I: GENERALIDADES..... | 16 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 16 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 21 |
| 1.3 OBJETIVOS | 25 |
| 1.3.1 Objetivo General | 25 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 25 |
| 1.4 ALCANCES | 25 |
| CAPÍTULO II: MODELO ESTRUCTURAL..... | 26 |
| 2.1 MODELO DEL SISTEMA TANQUE-AGUA..... | 26 |
| 2.2 MODELO DEL SISTEMA DE AISLACIÓN | 35 |
| 2.2.1 Modelo Bi-Axial | 35 |
| 2.2.2 Modelo Uni-Axial | 38 |
| 2.3 PARÁMETROS DEL ANÁLISIS..... | 41 |
| 2.3.1 Parámetros del Sistema Tanque-Agua..... | 41 |
| 2.3.2 Parámetros del Sistema de Aislación del Tipo FPS..... | 41 |
| 2.3.3 Casos de Estudio | 42 |
| CAPÍTULO III: ANÁLISIS SÍSMICO | 45 |
| 3.1 ECUACIONES DEL MOVIMIENTO | 45 |
| 3.2 ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA..... | 46 |
| 3.2.1 Métodos de Solución..... | 47 |
| 3.2.2 Método de Integración en el Tiempo | 49 |
| 3.2.3 Solución Incremental de las Ecuaciones del Movimiento | 50 |
| 3.3 SOLICITACIONES SÍSMICAS..... | 51 |
| 3.3.1 Selección de los Registros Sísmicos..... | 51 |

RESPUESTA SÍSMICA DE TANQUES DE CONCRETO ARMADO PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA APOYADOS SOBRE UN SISTEMA DE AISLACIÓN DEL TIPO PÉNDULO FRICCIONAL

| | |
|---|------------|
| 3.3.2 Escalamiento de los Registros Sísmicos..... | 52 |
| CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 55 |
| 4.1 EFECTO DEL MOVIMIENTO BI-DIRECCIONAL..... | 56 |
| 4.2 EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DEL ANÁLISIS..... | 66 |
| 4.2.1 Efecto de la Razón Altura del Agua-Radio Interior del Tanque H/R | 75 |
| 4.2.2 Efecto de la Razón Espesor de la Pared del Tanque-Radio Interior del Tanque e/R | 75 |
| 4.2.3 Efecto del Período Objetivo de Vibración del Sistema de Aislación T_b ... | 76 |
| 4.2.4 Efecto del Coeficiente de Fricción del Sistema de Aislación μ_b | 77 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 78 |
| 5.1 CONCLUSIONES..... | 78 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 79 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| ANEXO A | 88 |
| ANEXO B | 91 |
| ANEXO C | 113 |
| ANEXO D | 118 |
| ANEXO E | 121 |

RESUMEN

Los tanques para almacenamiento de agua son estructuras esenciales y por esta razón es de vital importancia conocer su comportamiento estructural cuando son sometidos a eventos sísmicos severos. Este trabajo muestra las respuestas sísmicas de tanques cilíndricos circulares de Concreto Armado (CA) para almacenamiento de agua apoyados sobre un sistema de aislación del tipo péndulo friccional (FPS, *friction pendulum system*) bajo sollicitación sísmica uni- y bi-direccional. Para el análisis sísmico se consideró que el tanque posee comportamiento elástico lineal, además se empleó un modelo mecánico equivalente para representar la interacción tanque-agua, y se utilizó un modelo hysterético del tipo bi-axial para representar el comportamiento inelástico no lineal del sistema de aislación. Los parámetros para representar el modelo de análisis son: (H/R) la razón altura del agua-radio interior del tanque, (e/R) la razón espesor de la pared del tanque-radio interior del tanque, (T_b) el período objetivo de vibración del sistema de aislación, y (μ_b) el coeficiente de fricción del sistema de aislación. Se utilizaron 21 pares de registros del movimiento sísmico del suelo los cuales fueron previamente seleccionados y escalados. Finalmente, se procedió con el análisis de la respuesta sísmica en el tiempo para estudiar el efecto del movimiento bi-direccional, y los efectos de los parámetros de estudio sobre la respuesta sísmica de tanques de CA para almacenamiento de agua de base aislada. Las respuestas sísmicas del sistema tanque-agua de base aislada muestran una efectividad en la reducción de los valores de la fuerza cortante basal en comparación con su equivalente de base fija del orden de hasta 73% para $H/R = 0.5$; 83% para $H/R = 1.0$; y 91% para $H/R = 2.0$.

ABSTRACT

Water storage tanks are essential structures and for this reason it is vital to know its structural behavior when they are subjected to severe seismic events. This work shows the seismic response of base-isolated circular cylindrical Reinforced Concrete (RC) water storage tanks with Friction Pendulum System (FPS) under uni- and bi-directional horizontal earthquake ground motions. For the seismic analysis, tanks were considered to have a linear elastic behavior, the tank-water interaction was represented by an equivalent mechanical model, and the inelastic non-linear behavior of the isolation system was represented by a bi-axial hysteretic restoring force model. The parameters of this study are: (H/R) the water-height/tank-inner-radius ratio, (e/R) the tank-wall-thickness/tank-inner-radius ratio, (T_b) the target vibration period of the isolation system, and (μ_b) the friction coefficient of the isolation system. Twenty-one pairs of selected and scaled ground motions were utilized. Time-history analysis was used to study the effect of bi-directional ground motion, as well as the effects of study parameters on seismic response of base-isolated RC water storage tanks. Seismic responses of base-isolated systems, when compared to base-fixed systems, show an effectiveness of FPS isolation system in the reduction of basal shear force values up to 73% for $H/R = 0.5$; 83% for $H/R = 1.0$; and 91% for $H/R = 2.0$.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Parámetros utilizados y valores asignados.....42

Tabla 2.2. Número de casos por analizar42

Tabla 2.3. Períodos de vibración de los modos impulsivo y convectivos.....44

Tabla 3.1. Movimientos sísmicos seleccionados52

Tabla 3.2. Factores de escala54



ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1.1 | Desplazamiento en la base de un tanque. | 16 |
| Figura 1.2 | Pandeo de las paredes de un tanque. | 16 |
| Figura 1.3 | Colapso de un tanque. | 17 |
| Figura 1.4 | Mejora de la seguridad, funcionamiento y preservación de un edificio gracias al sistema de aislación en la base. | 18 |
| Figura 1.5 | Conexiones flexibles para los servicios públicos. | 18 |
| Figura 1.6 | Comparación entre el resultado del modelo teórico y el medido experimentalmente para la altura del oleaje en el contacto con la pared del tanque bajo sollicitación sísmica horizontal. | 19 |
| Figura 1.7 | Aisladores instalados en la cimentación de un tanque para almacenamiento de gas natural líquido. | 20 |
| Figura 1.8 | Tanque para almacenamiento de gas natural líquido con base aislada después del terremoto de Maule 2010 de Magnitud 8.8. | 20 |
| Figura 1.9 | Mapa de macrozonificación sísmica del Perú. | 22 |
| Figura 1.10 | Mapa de microzonificación sísmica de Lima. | 23 |
| Figura 1.11 | Sistema de red primaria y almacenamiento de agua para Lima-Callao. | 24 |
| Figura 2.1 | Configuración del tanque cilíndrico de sección circular. | 27 |
| Figura 2.2 | Raíces de la derivada de la función de Bessel de primera clase y de primer orden. | 30 |
| Figura 2.3 | Modelo estructural del sistema tanque-agua de base fija. | 33 |
| Figura 2.4 | Porcentajes de masas participativas modales acumuladas. | 34 |
| Figura 2.5 | Aislador del tipo FPS. | 35 |
| Figura 2.6 | Modelo histerético del sistema de aislación del tipo FPS (vista en planta). | 36 |
| Figura 2.7 | Variación del coeficiente de fricción del sistema de aislación del tipo FPS con la presión, y velocidad de deslizamiento. | 37 |
| Figura 2.8 | Recorrido del desplazamiento lineal del sistema de aislación en función de sus componentes en las direcciones x e y | 39 |
| Figura 2.9 | Comportamiento histerético componente histerética-desplazamiento del sistema de aislación. | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.10 Comportamiento histerético fuerza-desplazamiento del sistema de aislación. | 40 |
| Figura 2.11 Período de vibración del modo impulsivo del sistema tanque-agua y comparación con una aproximación simple. | 43 |
| Figura 3.1 Modelo estructural de base fija. | 45 |
| Figura 3.2 Modelo estructural de base aislada con FPS. | 45 |
| Figura 3.3 SR promedio escalado en amplitud para minimizar el MSE con respecto al espectro de diseño objetivo (razón de amortiguamiento crítico de 5%). | 53 |
| Figura 4.1 Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección x debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados). | 57 |
| Figura 4.2 Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección y debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados). | 58 |
| Figura 4.3 Comportamiento fuerza-desplazamiento del sistema de aislación del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados). | 59 |
| Figura 4.4 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$ | 61 |
| Figura 4.5 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$ | 62 |
| Figura 4.6 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$ | 64 |
| Figura 4.7 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | sistemas de base aislada con $e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$ | 65 |
| Figura 4.8 | Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base fija y del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección x debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados)..... | 67 |
| Figura 4.9 | Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base fija y del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección y debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados)..... | 68 |
| Figura 4.10 | Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.02$; $H/R =$ 0.5 , $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$). | 70 |
| Figura 4.11 | Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.04$; $H/R =$ 0.5 , $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$). | 71 |
| Figura 4.12 | Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.02$; $H/R =$ 0.5 , $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$). | 73 |
| Figura 4.13 | Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.04$; $H/R =$ 0.5 , $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$). | 74 |

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS Y VARIABLES

| | |
|----------------------|---|
| CA | Concreto armado |
| DE | Design earthquake (sismo de diseño) |
| FNA | Fast nonlinear analysis (análisis no lineal rápido) |
| FPS | Frictional pendulum system (sistema péndulo friccional) |
| MCE | Maximum considered earthquake (sismo máximo considerado) |
| MSE | Mean squared error (error cuadrático medio) |
| PGA | Peak ground acceleration (aceleración máxima del suelo) |
| RC | Reinforced concrete (concreto armado) |
| SR | Spectrum resultant (espectro resultante) |
| SRSS | Square root of the sum of the squares (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados) |
| TPB | Triple Pendulum Bearings (sistema de aislación del tipo péndulo triple) |
| a | Coefficiente que controla la dependencia de la fricción sobre la velocidad de deslizamiento |
| A | Parámetro que controla la amplitud de la fuerza de restitución del sistema de aislación |
| A_g | Área de la sección transversal del tanque |
| A_s | Área de corte de la sección transversal del tanque |
| $A(t), B(t)$ | Coefficientes que dependen del tiempo |
| c_0 | Amortiguamiento asociado a la masa impulsiva |
| c_j | Amortiguamiento asociado a la j -ésima masa convectiva |
| \mathbf{C} | Matriz de amortiguamiento de la superestructura |
| $\tilde{\mathbf{C}}$ | Matriz reducida de amortiguamiento |
| \mathbf{C}_b | Matriz de amortiguamiento viscoso del sistema de aislación |
| C_j | Vea la Ec. (2.13) o (2.14) |
| d | Desplazamiento vertical del oleaje (<i>sloshing</i>), medido desde la superficie libre del agua en reposo. |
| d_{cx}, d_{cy} | Desplazamientos verticales del oleaje sobre la superficie libre del agua en el contacto con la pared del tanque a lo largo de las direcciones x e y |

| | |
|---|--|
| D_j | Posición de la superficie libre del agua en el contacto con la pared del tanque, cuando la onda superficial está en oleaje en su j -ésimo modo |
| e | Espesor de la pared del tanque |
| E_{CA} | Módulo de elasticidad del CA |
| f_{min} | Coefficiente de fricción a velocidad de deslizamiento pequeña bajo presión constante |
| f_{max} | Coefficiente de fricción a velocidad de deslizamiento grande bajo presión constante |
| \mathbf{f} | Vector que contiene las fuerzas de restitución no lineales del sistema de aislación |
| $\mathbf{f}_t, \mathbf{f}_{t+\Delta t}$ | Vea las Ecs. (3.4), (3.5), y (3.6) |
| F_{bx}, F_{by} | Fuerzas de restitución en las direcciones x e y |
| g | Aceleración debida a la gravedad |
| G_{CA} | Módulo de corte del CA |
| h_0 | Altura sobre el fondo del tanque donde actúa la componente impulsiva de la fuerza resultante |
| h_j | Altura sobre el fondo del tanque donde actúa la j -ésima componente convectiva de la fuerza resultante |
| H | Altura del agua |
| I | Momento de inercia de la sección transversal del tanque |
| \mathbf{I} | Matriz identidad |
| J_1 | Función de Bessel de primera clase y de primer orden |
| J'_1 | Primera derivada de la función de Bessel de primera clase y de primer orden |
| k_0 | Rigidez asociada a la masa impulsiva |
| k_b | Rigidez lateral de pre-fluencia del sistema de aislación |
| k_j | Rigidez asociada a la j -ésima masa convectiva |
| \mathbf{K} | Matriz de rigidez de la superestructura |
| \mathbf{K}_b | Matriz de rigidez elástica del sistema de aislación |
| $\tilde{\mathbf{K}}$ | Matriz reducida de rigidez |
| m_0 | Masa impulsiva equivalente del agua |
| m_a | Masa total del agua |
| m_b | Masa propia del tanque |

| | |
|------------------------|---|
| m_j | Masa modal del agua correspondiente al j -ésimo modo del movimiento convectivo |
| m_t | Masa total del sistema tanque-agua |
| M | Momento volcante de las paredes resultante, ejercido sobre las paredes del tanque |
| \mathbf{M} | Matriz de masa (diagonal) de la superestructura |
| $\tilde{\mathbf{M}}$ | Matriz reducida de masa |
| \mathbf{M}_b | Matriz de masa (diagonal) de la base rígida del tanque |
| M_w | Magnitud de momento sísmico |
| M_{yx} | Momento volcante de las paredes en la dirección y debido a las fuerzas producidas en la dirección x |
| M_{xy} | Momento volcante de las paredes en la dirección x debido a las fuerzas producidas en la dirección y |
| n | Coordenada generalizada |
| N | Número de modos convectivos |
| p | Presión hidrodinámica |
| $\tilde{\mathbf{P}}_t$ | Matriz reducida de sollicitación |
| p^i | Componente impulsiva de la presión hidrodinámica |
| p^c | Componente convectiva de la presión hidrodinámica |
| q_y | Desplazamiento de fluencia del sistema de aislación |
| r | Coordenada radial |
| R | Radio interior del tanque |
| R_{FPS} | Radio de curvatura del sistema de aislación |
| \mathbf{R} | Matriz de influencia del sismo |
| S | Fuerza cortante basal resultante, ejercida sobre las paredes del tanque |
| S_1 | Roca o suelos muy rígidos con V_{S30} entre 500 m/s y 1 500 m/s |
| S_2 | Suelos intermedios con V_{S30} entre 180 m/s y 500 m/s |
| S_x, S_y | Fuerzas cortantes basales en las direcciones x e y |
| t | Tiempo |
| T_0 | Período natural de vibración del modo impulsivo |
| T_j | Período natural de vibración del j -ésimo modo convectivo |
| T_b | Período objetivo de vibración del sistema de aislación |
| T_n | Período natural de vibración |
| u | Dirección asociada a $\theta = 0$ |

| | |
|------------------------------|--|
| \mathbf{u} | Vector de desplazamiento asociado a los grados de libertad relativos a la base del tanque |
| \mathbf{u}^* | Vector de desplazamiento modal relativo a la base del tanque |
| u_0 | Desplazamiento lateral relativo a la base del tanque asociada a la masa impulsiva |
| u_b | Desplazamiento lateral de la base del tanque relativo al suelo, asociada a la masa propia del tanque |
| u_j | Desplazamiento lateral relativo a la base del tanque asociada a la j -ésima masa convectiva |
| u_{bx}, u_{by} | Desplazamientos laterales del sistema de aislación relativos al suelo en las direcciones x e y |
| $\ddot{\mathbf{u}}_t$ | Vea las Ecs. (3.4), (3.5), y (3.6) |
| $\dot{\mathbf{u}}$ | Vector de velocidad asociado a los grados de libertad relativos a la base del tanque |
| \dot{u}_g | Velocidad lateral del suelo |
| $\ddot{\mathbf{u}}_t$ | Vea las Ecs. (3.4), (3.5), y (3.6) |
| $\dot{u}_{bx}, \dot{u}_{by}$ | Velocidades laterales del sistema de aislación relativos al suelo en las direcciones x e y |
| \dot{u}_b^* | Velocidad instantánea de deslizamiento |
| $\dot{\mathbf{u}}^*$ | Vea la Ec. (3.3), y (3.4) |
| $\ddot{\mathbf{u}}$ | Vector de aceleración asociado a los grados de libertad relativos a la base del tanque |
| \ddot{u}_g | Aceleración horizontal del suelo |
| $\ddot{\mathbf{u}}_b$ | Vector de aceleración de la base del tanque relativo al suelo |
| $\ddot{\mathbf{u}}_g$ | Vector de aceleración del suelo |
| $\ddot{\mathbf{u}}_t$ | Vea las Ecs. (3.4), (3.5), y (3.6) |
| $\ddot{\mathbf{u}}^*$ | Vea la Ec. (3.3), y (3.4) |
| v_n | Velocidad de flujo en la dirección de la coordenada generalizada n |
| V_{S30} | Velocidad promedio de propagación de ondas de corte para los 30 m superiores del perfil del suelo |
| W | Peso total del sistema tanque-agua |
| x, y | Coordenadas cartesianas, direcciones o componentes |
| z | Coordenada axial |

| | |
|--------------------|---|
| Z | Factor de zona que se interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años normalizada a la aceleración de la gravedad |
| Z_h | Variable hysterética |
| Z_{hx}, Z_{hy} | Variabes hysteréticas en las direcciones x e y |
| α | Razón entre la altura de agua y el radio interior del tanque (H/R) |
| β | Parámetro que controla la forma del lazo hysterético de la relación fuerza-desplazamiento del sistema de aislación |
| β_j | Vea la Ec. (2.15) o (2.16) |
| Δ | Incremento en un paso de tiempo |
| Δf | Vea la Ec. (3.7) |
| $\Delta \ddot{u}$ | Vea la Ec. (3.7) |
| $\Delta \dot{u}$ | Vea la Ec. (3.7) |
| $\Delta \ddot{u}$ | Vea la Ec. (3.7) |
| Δt | Paso de tiempo |
| ε | Vea las Ecs. (2.11), (2.13), y (2.14) |
| ζ_a | Razón de amortiguamiento crítico del agua |
| ζ_i | Razón de amortiguamiento crítico modal del sistema de base fija en el i-ésimo modo |
| ζ_{CA} | Razón de amortiguamiento crítico del concreto armado |
| $\zeta_i \omega_i$ | Vea la Ec. (3.4) |
| η | Parámetro que representa la relación de la coordenada axial y el radio interior del tanque (z/R) |
| θ | Coordenada circunferencial |
| λ_j | j-ésima raíz de $J'_1(\lambda)=0$ |
| μ_b | Coefficiente de fricción del sistema de aislación |
| ξ | Parámetro que representa la relación de la coordenada radial y el radio interior del tanque (r/R) |
| ρ_a | Densidad del agua |
| ρ_{CA} | Densidad del CA |
| ν_{CA} | Razón de Poisson |
| φ | Función potencial de velocidad |
| φ_i | Componente impulsiva de la función potencial de velocidad |
| φ_c | Componente convectiva de la función potencial de velocidad |

| | |
|--------------|--|
| ϕ | Factor de deformación cortante |
| Φ | Matriz modal normalizada con respecto a la matriz de masa |
| Φ^T | Transpuesta de la matriz Φ |
| γ | Parámetro que controla la forma del lazo histerético de la relación fuerza-desplazamiento del sistema de aislación |
| ω_b | Frecuencia natural circular de vibración del sistema de aislación |
| ω_i | Frecuencia natural circular de vibración del sistema de base fija correspondiente al i -ésimo modo |
| ω_j | Frecuencia natural circular de vibración de vibración correspondiente al j -ésimo modo convectivo |
| ω_i^2 | Vea la Ec. (3.4) |



INTRODUCCIÓN

Los tanques para almacenamiento de agua son parte fundamental del sistema de red de abastecimiento de agua para la población, sin embargo, los eventos sísmicos severos ocasionan graves daños estructurales tales como excesivos desplazamientos laterales, pandeo, y el colapso (Zareian *et al.*, 2012). En países altamente sísmicos como Perú, donde muchos tanques son construidos en la zona sísmica 4 ($Z = 0.45$), sobre suelos tipo S_1 (V_{S30} entre 500 m/s a 1 500 m/s) y tipo S_2 (V_{S30} entre 180 m/s a 500 m/s), siendo Z la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años normalizada a la aceleración de la gravedad y V_{S30} la velocidad promedio de propagación de ondas de corte para los 30 m superiores del perfil del suelo (MVCS, 2016), es muy importante que estas estructuras permanezcan operacionales después de un evento sísmico severo. Por otro lado, las técnicas de aislación sísmica han demostrado su efectividad para mejorar el desempeño sísmico de tanques para almacenamiento de agua (Malhotra, 1997; Wang *et al.*, 2001). Sin embargo, existe relativa escasez de investigaciones sobre la respuesta sísmica de tanques cilíndricos circulares de CA para almacenamiento de agua de base aislada con FPS (Zayas, 1987) bajo solicitaciones sísmicas bi-direccionales compatibles con un espectro objetivo. Es una práctica común estimar las respuestas sísmicas de los sistemas tanque-agua de base fija utilizando el muy conocido modelo mecánico equivalente de Housner, o uno de sus derivados (Housner, 1957; Haroun y Housner, 1981; Veletsos, 1984; Wang *et al.*, 2001). El principal objetivo de este trabajo es contribuir al conocimiento de la respuesta sísmica de tanques cilíndricos circulares de CA para almacenamiento de agua de base aislada con FPS solicitado por acciones sísmicas bi-direccionales compatibles con un espectro de diseño normativo. Los objetivos específicos de este trabajo son: i) estudiar el efecto del movimiento bi-direccional, y ii) los efectos de los parámetros del sistema tanque-agua de base aislada, sobre la respuesta sísmica de tanques de CA para almacenamiento de agua de base aislada.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los tanques para almacenamiento de agua son parte fundamental del sistema de abastecimiento de agua para la población. Sin embargo, en las últimas décadas, los sismos de grandes magnitudes han ocasionado graves daños estructurales tales como excesivos desplazamientos laterales en la base, pandeo en las paredes, y el colapso (Figura 1.1, 1.2 y 1.3) sobre este tipo de estructuras (Manos y Clough, 1985; Davey, 2010; Billings y Charman, 2011; Zareian *et al.*, 2012).



Figura 1.1 Desplazamiento en la base de un tanque.

Fuente: nisee.berkeley.edu/elibrary



Figura 1.2 Pandeo de las paredes de un tanque.

Fuente: nisee.berkeley.edu/elibrary



Figura 1.3 Colapso de un tanque.

Fuente: nisee.berkeley.edu/elibrary

En países altamente sísmicos como Perú es muy importante que estas estructuras permanezcan operacionales después de un evento sísmico severo, donde muchos tanques son construidos en la zona sísmica 4 y sobre suelos tipo S_2 (MVCS, 2016). Históricamente, los sismos han producido devastaciones importantes a la humanidad, por este motivo en los últimos años se han desarrollado diferentes procedimientos de diseño sismo-resistente de estructuras orientadas a mitigar sus efectos, siendo la aislación sísmica uno de estos.

La aislación sísmica es una alternativa en el diseño sismo-resistente de estructuras, especialmente en aquellos casos en el que se busca un mejor desempeño sísmico para las estructuras y sus contenidos a través de la reducción y el control de las vibraciones. El excelente desempeño que las estructuras aisladas han tenido durante eventos sísmicos severos (Buckle y Mayes, 1990; Kasai *et al.*, 2013), respaldan las ventajas de esta alternativa en cuanto a aumentar considerablemente el nivel de seguridad para las personas y la operatividad de las estructuras. Además, estudios teóricos, análisis numéricos y ensayos de laboratorio demuestran el buen comportamiento que se puede lograr con los sistemas de aislación en la protección de estructuras sometidas a movimientos sísmicos severos (Naeim y Kelly, 1999; Deb, 2004; Christopoulos y Filiatrault, 2006).

Por lo tanto, es importante destacar que el análisis sísmico, juega un papel importante en el desarrollo del desempeño requerido en la etapa de diseño sismo-resistente de estructuras con sistema de aislación sísmica en la base. El hecho de implementar un sistema de aislación en la base hace ventajoso el comportamiento de la estructura debido a que evita los efectos más dañinos que se pueden producir en la estructura a causa de los esfuerzos resultantes de los

desplazamientos relativos entre niveles, donde el alargamiento del período objetivo de vibración del sistema de aislación se logra a través de la introducción de un soporte entre la cimentación y la estructura (Figura 1.4). El sistema tenderá a deformarse sólo en la inter-fase de aislación, transmitiendo bajos esfuerzos cortantes a la estructura la que sufre un movimiento de bloque rígido, por ende con poca deformación y daño. Por este motivo, la aislación sísmica de la base es más recomendable en estructuras rígidas sobre suelos firmes. El aumento del amortiguamiento viene dado principalmente por el sistema de aislación utilizado. Este aumento de amortiguamiento busca reducir la demanda de deformaciones sobre el sistema de aislación y la estructura. Además, se tiene que tener en cuenta que las conexiones a servicios públicos deben ser flexibles debido a que en un evento sísmico el desplazamiento horizontal de las base relativo al suelo podría dañar estas conexiones (Figura 1.5).

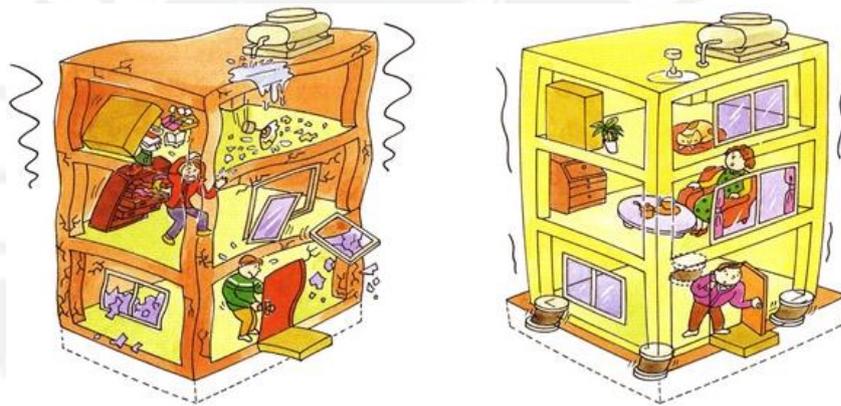


Figura 1.4 Mejora de la seguridad, funcionamiento y preservación de un edificio gracias al sistema de aislación en la base.

Fuente: OBAYASHI, 2000



Figura 1.5 Conexiones flexibles para los servicios públicos.

Fuente: Kelly, 2013

Por otro lado, se han realizado estudios teóricos (Housner, 1954, 1957, 1963; Haroun y Housner, 1981, 1982; Veletsos, 1984; Wang *et al.*, 2001) y experimentales (Clough, 1977; Kim y Lee, 1995, De Angelis *et al.*, 2010) sobre la respuesta sísmica de tanques para almacenamiento de agua de base fija y de base aislada apoyados sobre cimentaciones. En uno de los estudios experimentales (Chalhoub y Kelly, 1988, 1990) se observó que el sistema de aislación redujo drásticamente la amplificación de las aceleraciones, la componente impulsiva (parte del fluido que se mueve de manera solidaria con el tanque) de la presión del fluido disminuyó. La baja frecuencia que caracteriza el movimiento de estructuras de base aislada puede estar cerca de las frecuencias del oleaje (*sloshing*), componente convectiva (parte del fluido asociada con el movimiento hidrodinámico del agua relativo al tanque) y afectar a la respuesta de la elevación del agua. Sin embargo, la reducción en la componente impulsiva es mucho más significativa que el incremento en la componente convectiva, produciendo una presión dinámica total más baja para los tanques con sistemas de aislación, la Figura 1.6 muestra la comparación entre el resultado del modelo teórico (usando 3 modos convectivos) y el medido experimentalmente para la altura del oleaje en el contacto con la pared del tanque bajo solicitación sísmica horizontal uni-direccional (sistema tanque-agua de base fija).

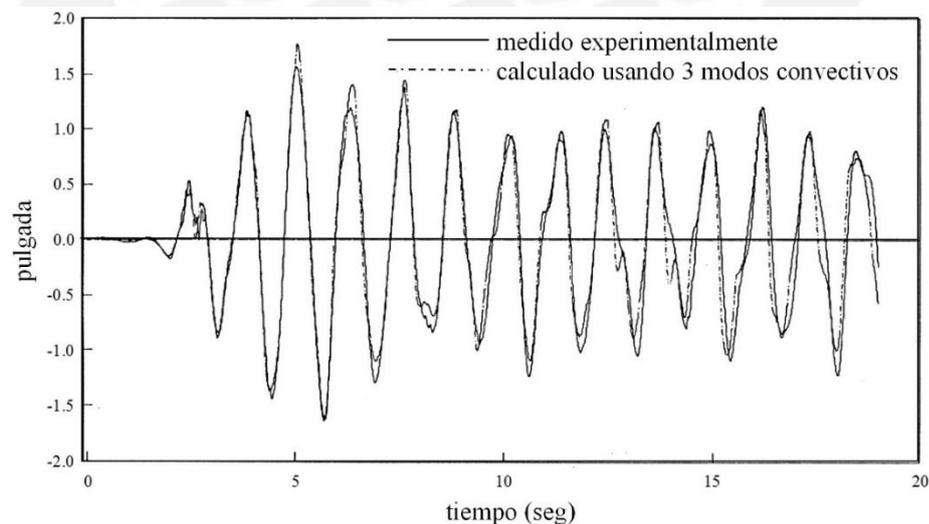


Figura 1.6 Comparación entre el resultado del modelo teórico y el medido experimentalmente para la altura del oleaje en el contacto con la pared del tanque bajo solicitación sísmica horizontal.

Fuente: Chalhoub y Kelly, 1988, 1990

En uno de los estudios teóricos (Malhotra, 1997) se observó que las respuestas sísmicas provenientes de las presiones hidrodinámicas tales como el momento volcante de las paredes se redujeron entre 65% y 74% en comparación a los tanques de base fija. Sin embargo, existe relativa escasez de investigaciones sobre la respuesta sísmica de tanques cilíndricos circulares de CA para almacenamiento de agua de base aislada con FPS bajo solicitaciones sísmicas bi-direccionales.

La Figura 1.7 muestra una aplicación de aislamiento sísmico en un tanque para almacenamiento de gas natural líquido, los aisladores son instalados en la parte superior de la cimentación durante la construcción, y la Figura 1.8 muestra al tanque aislado después del terremoto de Maule 2010 de Magnitud 8.8 (EPS, 2010; Zayas, 2013).



Figura 1.7 Aisladores instalados en la cimentación de un tanque para almacenamiento de gas natural líquido.

Fuente: EPS, 2010



Figura 1.8 Tanque para almacenamiento de gas natural líquido con base aislada después del terremoto de Maule 2010 de Magnitud 8.8.

Fuente: Zayas, 2013

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la ciudad de Lima existen alrededor de 900 tanques de CA (enterrados, apoyados y elevados) para almacenamiento de agua con una capacidad aproximada de 1 millón de m³ (SEDAPAL, 2014), los cuales se ubican en zonas de bajo a muy alto peligro sísmico (CISMID, 2014; MVCS, 2016) tal como se muestran en las Figuras 1.9, 1.10 y 1.11.

Debido a su ubicación, un evento sísmico puede inducir presiones hidrodinámicas importantes sobre las paredes de los tanques; y el momento volcante de las paredes causado por las presiones laterales podría ocasionar excesivos esfuerzos de compresión en un extremo del tanque y producir el pandeo de las paredes (Liu y Uras, 1989a, 1989b; Uras y Liu, 1990).

El daño de los tanques para almacenamiento de agua no solo interrumpe el servicio que proporciona la infraestructura esencial, sino que también podría causar pérdidas: i) directas, tales como económicas y materiales, e ii) indirectas, tales como cortes de agua, incendios, epidemias y contaminación ambiental, además de una perturbación importante en los hogares, las actividades económicas, los servicios públicos y privados, por lo tanto, la operatividad post-sismo de los tanques para almacenamiento de agua es de gran importancia.

Teniendo en cuenta los graves daños que podrían producirse en los tanques para el almacenamiento de agua y las consiguientes pérdidas económicas debido a la ocurrencia de un sismo severo, la protección sísmica de este tipo de estructuras esenciales es fundamental.

Consecuentemente con ello, las disposiciones de diseño sísmico para los tanques son cada vez más estrictas (ACI, 2006; ASCE, 2010), el desarrollo rentable del diseño sismo-resistente, y las técnicas de reconstrucción para tanques de almacenamiento de gran escala son cruciales (FEMA, 2000).

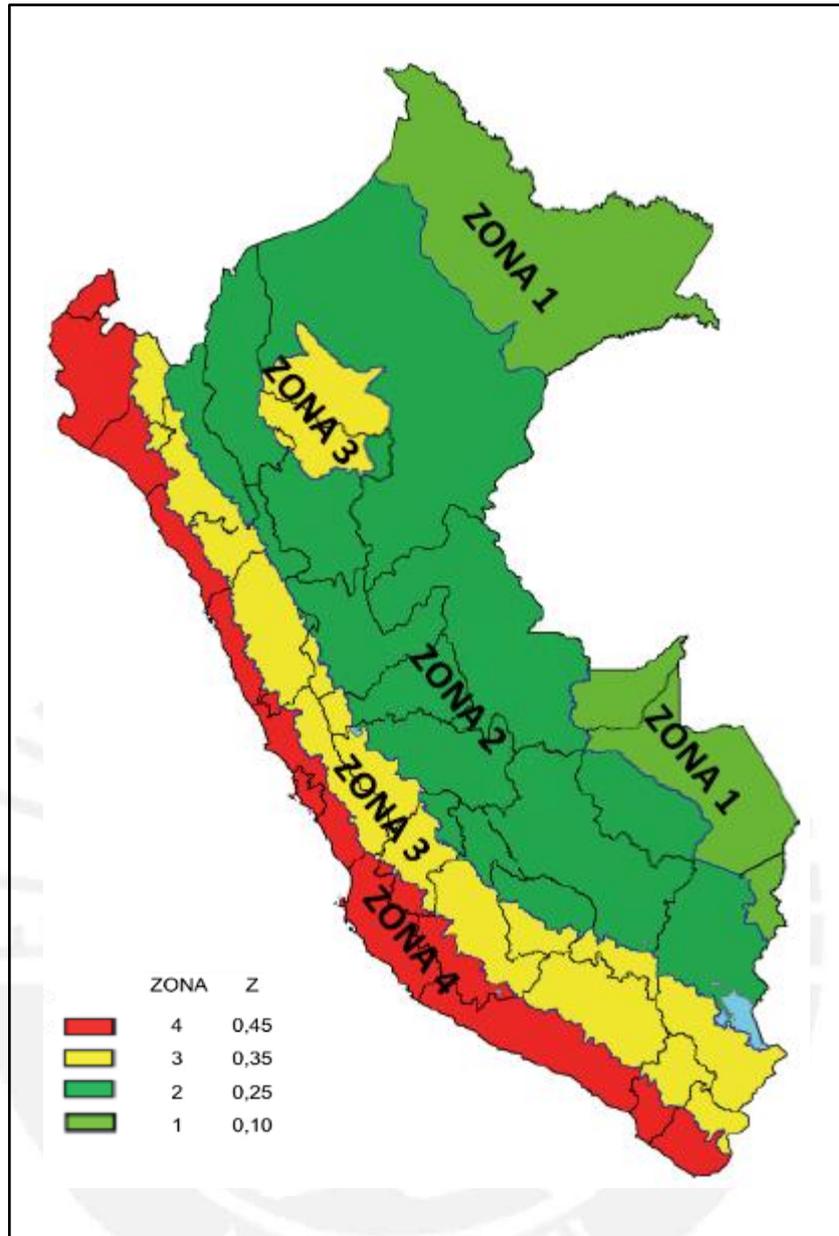


Figura 1.9 Mapa de macrozonificación sísmica del Perú.

Fuente: MVCS, 2016

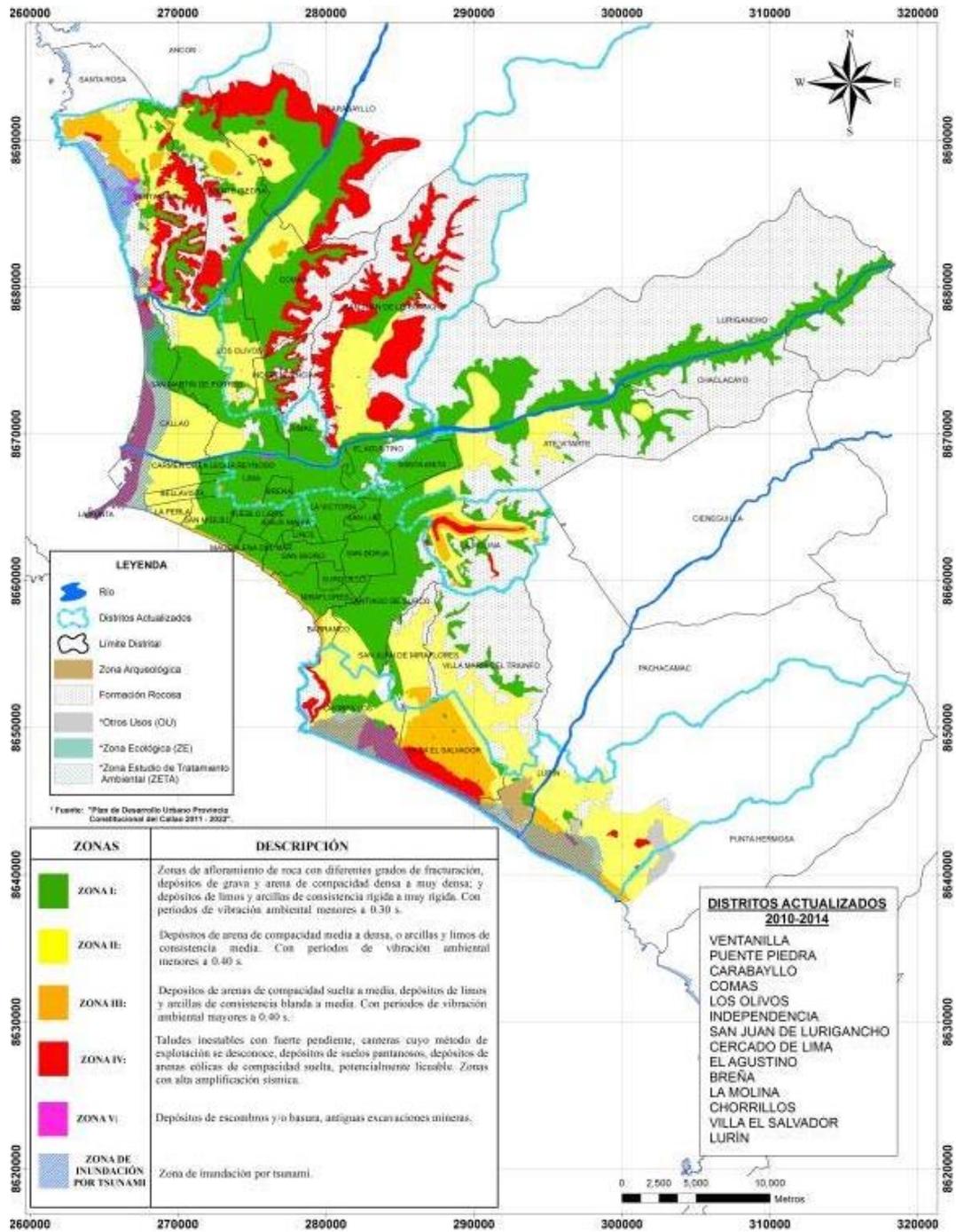


Figura 1.10 Mapa de microzonificación sísmica de Lima.

Fuente: CISMID, 2014

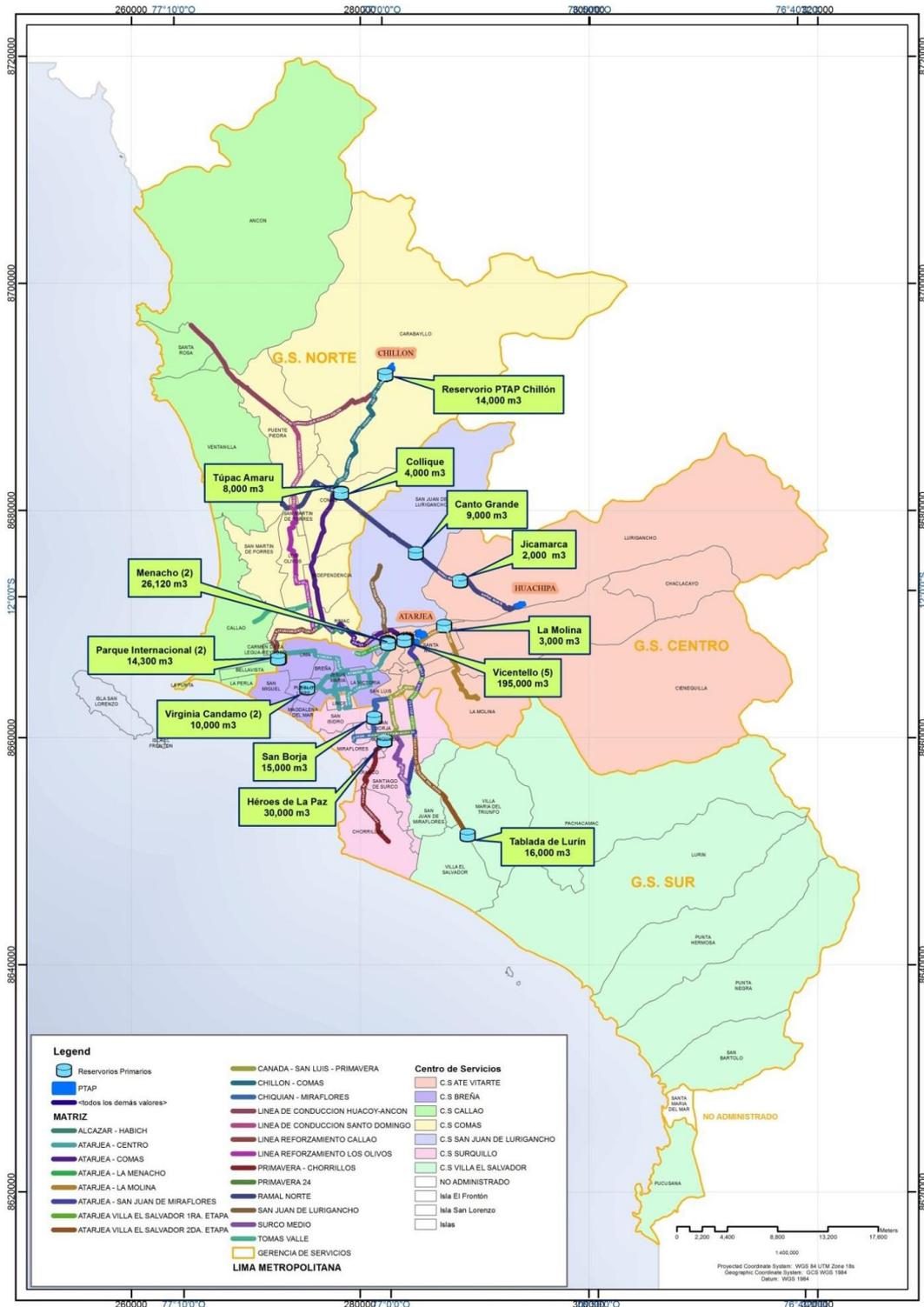


Figura 1.11 Sistema de red primaria y almacenamiento de agua para Lima-Callao.

Fuente: SEDAPAL, 2014

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la respuesta sísmica de tanques cilíndricos circulares de CA para almacenamiento de agua con sistema de aislación en la base del tipo FPS solicitados por acciones sísmicas bi-direccionales compatibles con un espectro de diseño.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Estudiar el efecto del movimiento bi-direccional sobre la respuesta sísmica de los sistemas tanque-agua de base aislada.
- b) Estudiar los efectos de los parámetros del sistema tanque-agua de base aislada sobre la efectividad del sistema de aislación del tipo FPS.

1.4 ALCANCES

Este trabajo expone un modelo estructural-hidrodinámico híbrido y un método de solución analítico que permite evaluar en forma simple, precisa y efectiva la respuesta sísmica de tanques cilíndricos circulares de CA para almacenamiento de agua de base aislada con FPS mediante un análisis de las respuestas sísmicas en el tiempo a través de una herramienta computacional (CSI, 2014).

La efectividad del sistema de aislación del tipo FPS se verificó a través de extensas simulaciones numéricas de los casos de estudio obtenidos paramétricamente que consideró el efecto de 21 pares de registros sísmicos correspondientes a las dos componentes horizontales, medidas en distintos lugares del mundo.

Finalmente, se presentan gráficos para estimar las respuestas sísmicas de interés del sistema tanque-agua de base aislada con FPS correspondientes a los parámetros de estudio.

CAPÍTULO II: MODELO ESTRUCTURAL

El modelamiento en elementos finitos de tanques para almacenamiento de agua con sistema de aislación en la base es extremadamente complicado, por lo tanto se usara un modelo mecánico equivalente, el cual puede ser usado con confianza para un análisis y diseño preliminar de sistemas tanque-agua de base fija y base aislada (Christovasilis y Whittaker, 2008; Moslemi, 2011). Para estimar las respuestas sísmicas de interés (fuerza cortante basal, momento volcante de las paredes, desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*), y desplazamiento lateral de la base del tanque), se utilizó un modelo estructural tanque-agua de base fija y un modelo estructural tanque-agua de base aislada con FPS.

2.1 MODELO DEL SISTEMA TANQUE-AGUA

El comportamiento sísmico de tanques para almacenamiento de agua es muy complejo debido a que la interacción estructura-agua conduce a un procedimiento tedioso de diseño desde un punto de vista sismo-resistente, por lo tanto es de gran importancia el desarrollo de expresiones que describan las presiones dinámicas del agua durante un sismo. Los primeros estudios resolvieron el problema correspondiente a un tanque para almacenamiento de agua de forma rectangular, semicircular, triangular y circular, donde se observó que la presión del agua debido al movimiento sísmico del suelo, es muy importante para el diseño sísmico de los tanques. (Werner y Sundquist, 1949; Jacobsen, 1949, 1952; Graham y Rodriguez, 1952).

Posteriormente, se desarrolló una forma más concluida de la teoría de las presiones dinámicas en tanques para almacenamiento de agua, donde se propuso la estimación de un tipo de flujo el cual es similar al movimiento real del agua para determinar las presiones dinámicas, es a partir de ahí que para investigar las respuestas sísmicas se desarrolló un modelo mecánico equivalente que representa el movimiento del agua, en el cual una parte de la masa total del agua permanece fija (masa impulsiva) a las paredes del tanque, y la otra parte en movimiento oscilatorio que es representada por una serie de masas móviles (masas convectivas) unidas a las paredes por medio de resortes (Housner, 1954, 1957, 1963; Newmark y Rosenblueth, 1971; Epstein, 1976; Haroun, 1983; Veletsos, 1984, Wang *et al.*, 2001). Los análisis anteriores fueron llevados a cabo de la misma manera, mediante la resolución de la ecuación de Laplace dadas las

RESPUESTA SÍSMICA DE TANQUES DE CONCRETO ARMADO PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA APOYADOS SOBRE UN SISTEMA DE AISLACIÓN DEL TIPO PÉNDULO FRICCIONAL

condiciones de borde. Conocidas las soluciones de dichas ecuaciones y sabiendo que verifican las condiciones de borde, se hace posible obtener las soluciones mediante un método aproximado, el cual evita las ecuaciones diferenciales parciales y las series, y se presenta soluciones de forma simple para un número de casos significativo. Los métodos aproximados apelan a la intuición física y hacen fácil ver donde surgen las presiones, esto hace que sea particularmente conveniente para las aplicaciones en ingeniería.

Todo lo anterior constituye la base teórica utilizada por una serie de países en la elaboración de sus normas de diseño referidas a tanques. Para este trabajo solo se consideraran las presiones en las paredes del tanque.

El propósito de esta sección es dar a conocer el modelo matemático que se utilizó para estudiar el comportamiento dinámico de tanques cilíndricos de CA para almacenamiento de agua. Para definir la geometría básica de la estructura que representa el sistema tanque-agua (Figura 2.1), se requiere de la siguiente información:

- Altura del agua (H).
- Radio interior del tanque (R).
- Espesor de la pared del tanque (e).

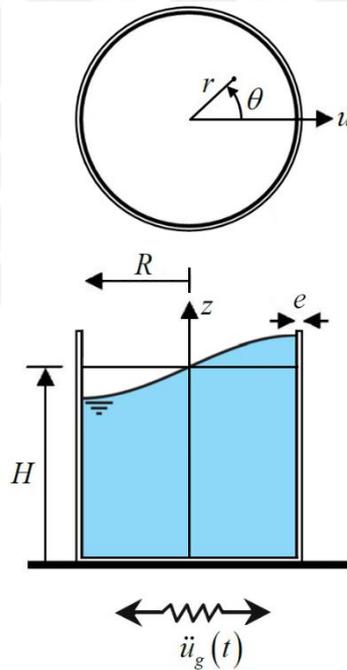


Figura 2.1 Configuración del tanque cilíndrico de sección circular.

Considerando un comportamiento elástico lineal por parte del tanque, los materiales a emplear quedan definidos por las siguientes propiedades:

- a) Módulo de elasticidad del CA (E_{CA})
- b) Densidad del CA (ρ_{CA})
- c) Razón de Poisson (ν_{CA})
- d) Densidad del agua (ρ_a)

El tanque de CA de forma cilíndrica y de sección transversal circular, fue representado por un sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z), donde r es la coordenada radial, θ es la coordenada circunferencial y z es la coordenada axial. Dicho tanque almacena agua hasta un nivel igual a H (Figura 2.1) y se asume al agua como un líquido incompresible, irrotacional y no viscoso. El sistema tanque-agua será sometido a la acción de un movimiento sísmico que actúa en la base representado por un registro de aceleración horizontal del suelo $\ddot{u}_g(t)$ en la dirección u asociada a $\theta = 0$.

La función potencial de velocidad, $\varphi(r, \theta, z, t)$, del flujo de agua dentro del tanque debe satisfacer la Ec. (2.1) de Laplace (Veletsos, 1984; Veletsos y Shivakumar, 1993; Wang *et al.*, 2001).

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

La velocidad de flujo en la dirección de la coordenada generalizada n , $v_n(r, \theta, z, t)$, está dada por $v_n = -\partial\varphi/\partial n$ y la presión hidrodinámica, $p(r, \theta, z, t)$, está dada por $p = \rho_a \partial\varphi/\partial t$. La solución de la Ec. (2.1) deberá satisfacer las condiciones de borde indicadas en las Ecs. (2.2) a (2.4).

La Ec. (2.2) indica que la componente vertical de la velocidad del agua debe ser igual a cero en la base del tanque ($z = 0$).

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (2.2)$$

La Ec. (2.3) indica que las velocidades radiales del agua y la pared del tanque deben ser consistentes en todo el perímetro interior de la pared del tanque ($r = R$); siendo $\dot{u}_g(t)$ la velocidad lateral del suelo.

$$-\left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=R} = \dot{u}_g(t) \cos \theta \quad (2.3)$$

La Ec. (2.4) indica que si la inercia vertical de las ondas superficiales es despreciable, la presión hidrodinámica en la superficie ($z = H$) debería ser igual al peso de la columna de agua por encima, siendo $d(r, \theta, t)$ el desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*), medido desde la superficie libre del agua en reposo y g la aceleración debida a la gravedad.

$$\rho_a \left. \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{z=H} = \rho_a g d(r, \theta, t) \quad (2.4)$$

La Ec. (2.5) indica la compatibilidad de la velocidad vertical en la superficie libre del agua.

$$-\left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=H} = \frac{\partial d(r, \theta, t)}{\partial t} \quad (2.5)$$

La solución de la Ec. (2.1) puede ser expresada convenientemente como la suma de la componente impulsiva φ_i asociada a la cantidad de agua que se mueve de manera solidaria con el tanque, y componente convectiva φ_c asociada con el movimiento hidrodinámico del agua relativo al tanque, Ec. (2.6).

$$\varphi(r, \theta, z, t) = \varphi_i(r, \theta, z, t) + \varphi_c(r, \theta, z, t) \quad (2.6)$$

En consecuencia $\partial \varphi / \partial z|_{z=0} = 0$ debido a que el tanque está sometido solo a excitación horizontal. Además las condiciones de borde pueden ser reescritas, Ec. (2.2) como $\partial \varphi / \partial z|_{z=0} = 0$, Ec. (2.3) como $\partial \varphi / \partial r|_{r=R} = -\dot{u}_g(t) \cos \theta$ y $\partial \varphi / \partial r|_{r=R} = 0$, Ec. (2.5) como $-\partial \varphi / \partial z|_{z=H} = \partial d(r, \theta, t) / \partial t$.

La solución φ_i puede obtenerse fácilmente, Ec. (2.7), y φ_c a partir de las Ecs. (2.1) a (2.7) por el método de separación de variables junto a la condición de borde $\partial\varphi/\partial r|_{r=R} = 0$, Ec. (2.8).

$$\varphi_i = -\dot{u}_g(t) r \cos \theta \quad (2.7)$$

$$\varphi_c(\xi, \theta, \eta, t) = \sum_{j=1}^{\infty} [A(t) \cosh(\lambda_j \eta) + B(t) \sinh(\lambda_j \eta)] J_1(\lambda_j \xi) \cos \theta \quad (2.8)$$

Siendo $\xi = r/R$, un parámetro que representa la relación de la coordenada radial y el radio interior del tanque; $\eta = z/R$, un parámetro que representa la relación de la coordenada axial y el radio interior del tanque; J_1 la función de Bessel de primera clase y de primer orden; y λ_j la j -ésima raíz de $J_1'(\lambda) = 0$ (Figura 2.2); $A(t)$ y $B(t)$ son coeficientes que dependen del tiempo y se determinan a partir de las condiciones de borde restantes.

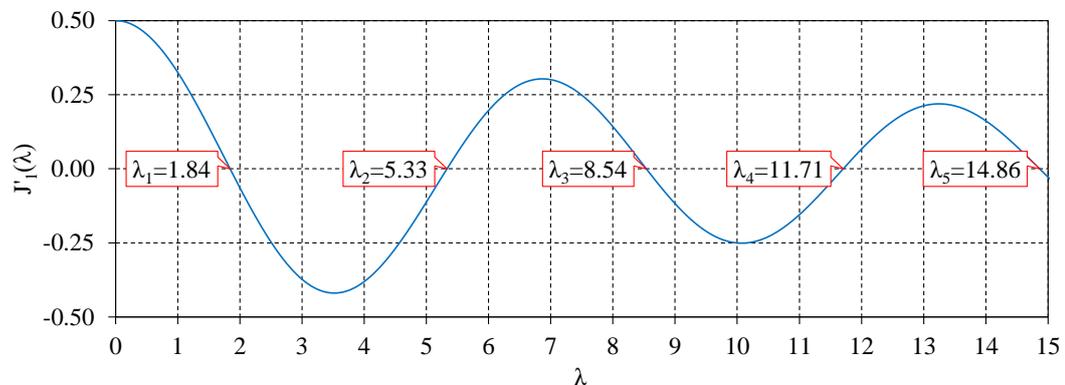


Figura 2.2 Raíces de la derivada de la función de Bessel de primera clase y de primer orden.

Además, el desplazamiento vertical del oleaje en la superficie libre del agua, que es igual a $d(\xi, \theta, t)$, puede mostrarse proporcional a $J_1(\lambda_j \xi) \cos \theta$, Ec. (2.9).

$$d(\xi, \theta, t) = \sum_{j=1}^{\infty} D_j(t) \frac{J_1(\lambda_j \xi)}{J_1(\lambda_j)} \cos \theta \quad (2.9)$$

Siendo $D_j(t)$ la posición de la superficie libre del agua en el contacto con la pared del tanque ($\xi = 1, \theta = 0$) cuando la onda superficial está en oleaje en su j -ésimo modo, en el Anexo A se muestran las 5 primeras formas de modo de la superficie del oleaje correspondientes al movimiento convectivo. Con las condiciones de borde $-\partial\varphi/\partial\eta|_{\eta=\alpha} = \partial d(r, \theta, t)/\partial t$ y $-\partial\varphi/\partial\eta|_{\eta=0} = 0$, donde $\alpha = H/R$, φ_c puede ser escrito como la Ec. (2.10).

$$\varphi_c(\xi, \theta, \eta, t) = -\sum_{j=1}^{\infty} \frac{R}{\lambda_j} \left[\frac{\dot{D}_j(t) \cosh(\lambda_j \eta)}{\sinh(\lambda_j \alpha)} \right] \frac{J_1(\lambda_j \xi)}{J_1(\lambda_j)} \cos \theta \quad (2.10)$$

A partir de la condición de borde, Ec. (2.4), y la propiedad de ortogonalidad de las funciones de Bessel, se establece la ecuación diferencial hidrodinámica del movimiento, Ec. (2.11), siendo $\omega_j^2 = (\lambda_j g/R) \tanh(\lambda_j \alpha)$, y $\varepsilon_j = 2/(\lambda_j^2 - 1)$.

$$\ddot{D}_j(t) + \omega_j^2 D_j(t) = -\varepsilon_j \lambda_j \tanh(\lambda_j \alpha) \ddot{u}_g(t) \quad (2.11)$$

Mientras tanto, la presión hidrodinámica, $p(\xi, \theta, \eta, t)$, sobre las paredes del tanque se representa mediante la Ec. (2.12), y mediante el uso de la Ec. (2.11) puede ser dividida en las componentes impulsiva p^i , Ec. (2.13), y convectiva p^c , Ec. (2.14), siendo $p = p^i + p^c$, siendo $C_j^2 = \omega_j^2 R/(g \lambda_j)$.

$$p(1, \theta, \eta, t) = \rho_a \left. \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{\xi=1} = -\rho_a R \cos \theta \left\{ \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \left[\frac{\ddot{D}_j(t) \cosh(\lambda_j \eta)}{\lambda_j \sinh(\lambda_j \alpha)} \right] \right\} \quad (2.12)$$

$$p^i = -\rho_a R \cos \theta \left[1 - \sum_{j=1}^{\infty} C_j^2 \frac{\varepsilon_j \cosh(\lambda_j \eta)}{\sinh(\lambda_j \alpha)} \right] \ddot{u}_g(t) \quad (2.13)$$

$$p^c = \rho_a R \cos \theta \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} C_j^2 \left[\frac{\varepsilon_j \cosh(\lambda_j \eta)}{\sinh(\lambda_j \alpha)} \right] \frac{\omega_j^2 D_j(t)}{\varepsilon_j \lambda_j \tanh(\lambda_j \alpha)} \right\} \quad (2.14)$$

A partir de las Ecs. (2.12) a (2.14) se obtiene la fuerza cortante basal resultante, $S(t)$, y el momento volcante de las paredes resultante, $M(t)$, ejercido sobre las paredes del tanque, Ec. (2.15) y (2.16). Siendo $\beta_j = \omega^2_j D_j(t)/[\varepsilon_j \lambda_j \tanh(\lambda_j \alpha)]$; m_0 la masa impulsiva equivalente del agua que se mueve de manera solidaria con el tanque, Ec. (2.17); y m_j la masa modal del agua correspondiente al j -ésimo modo del movimiento convectivo, Ec. (2.18), donde $m_a = \rho_a R^2 \pi H$ es la masa total del agua, Ec. (2.19); h_0 la altura sobre el fondo del tanque donde actúa la componente impulsiva de la fuerza resultante, Ec. (2.20); h_j la altura sobre el fondo del tanque donde actúa el j -ésimo componente convectivo de la fuerza resultante, Ec. (2.21).

$$S(t) = \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} p(1, \theta, \eta, t) R^2 \cos \theta d\theta d\eta = -m_0 \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j \beta_j(t) \quad (2.15)$$

$$M(t) = \int_0^{\alpha} \int_0^{2\pi} p(1, \theta, \eta, t) \eta R^3 \cos \theta d\theta d\eta = -m_0 h_0 \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j h_j \beta_j(t) \quad (2.16)$$

$$m_0 = m_a \left(1 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{C_j^2 \varepsilon_j}{\lambda_j \alpha} \right) \quad (2.17)$$

$$m_j = m_a \frac{C_j^2 \varepsilon_j}{\lambda_j \alpha} \quad (2.18)$$

$$m_a = m_0 + \sum_{j=1}^{\infty} m_j \quad (2.19)$$

$$h_0 = H \left\{ \frac{1}{2} - \sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{C_j^2 \varepsilon_j (1 - \cosh(\lambda_j \alpha))}{\lambda_j^2 \alpha^2 \sinh(\lambda_j \alpha)} + \frac{C_j^2 \varepsilon_j}{\lambda_j \alpha} \right) \right\} / \left(1 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{C_j^2 \varepsilon_j}{\lambda_j \alpha} \right) \quad (2.20)$$

$$h_j = H \left\{ \left(\frac{C_j^2 \varepsilon_j (1 - \cosh(\lambda_j \alpha))}{\lambda_j^2 \alpha^2 \sinh(\lambda_j \alpha)} + \frac{C_j^2 \varepsilon_j}{\lambda_j \alpha} \right) \right\} / \left(\frac{C_j^2 \varepsilon_j}{\lambda_j \alpha} \right) \quad (2.21)$$

La ecuación diferencial hidrodinámica del movimiento, Ec. (2.11), para cada modo puede ser modificada como un sistema equivalente masa-resorte de un grado de libertad sometido a una aceleración del suelo, Ec. (2.22), siendo $u_j(t) = D_j(t)/[\varepsilon_j \lambda_j \tanh(\lambda_j \alpha)]$ y $k_j = \omega_j^2 m_j$.

$$m_j \ddot{u}_j(t) + k_j u_j(t) = -m_j \ddot{u}_g(t) \quad (2.22)$$

Finalmente, la Figura 2.3 muestra el modelo mecánico equivalente del sistema tanque-agua de base fija, en donde H , R y e son la altura de agua, el radio interior del tanque y el espesor de la pared del tanque, respectivamente; k_j , c_j , h_j y $u_j(t)$ son la rigidez, el amortiguamiento, la altura, y el desplazamiento lateral relativo a la base del tanque, asociada a la j -ésima masa convectiva m_j ; k_0 , c_0 , h_0 y $u_0(t)$ son la rigidez, el amortiguamiento, la altura, y el desplazamiento lateral relativo a la base del tanque, asociada a la masa impulsiva m_0 ; $u_b(t)$ es el desplazamiento lateral de la base del tanque relativo al suelo, asociada a la masa propia del tanque m_b ; y $\ddot{u}_g(t)$ es la aceleración del suelo; y N representa el número de modos convectivos considerados.

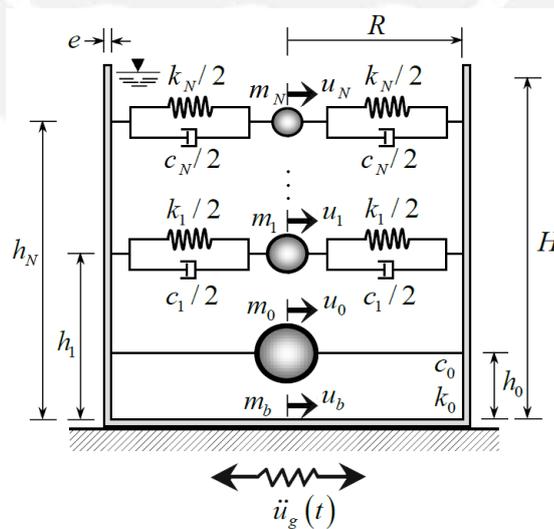


Figura 2.3 Modelo estructural del sistema tanque-agua de base fija.

Para tener en cuenta la flexibilidad del tanque, sus paredes (Figura 2.3) fueron representadas por elementos cáscara (Haroun, 1983). Además se consideró la razón de amortiguamiento crítico igual a $\zeta_a = 0.5\%$ para el agua y $\zeta_{CA} = 5\%$ para el CA, el módulo de elasticidad igual a $E_{CA} = 21\,300\text{ MPa}$ y la razón de Poisson $\nu_{CA} = 0.20$ para el CA, la densidad de masa igual a $\rho_a = 1\,000\text{ kg/m}^3$ para el agua y $\rho_{CA} = 2\,400\text{ kg/m}^3$ para el CA (ACI, 2006).

El peso total del sistema tanque-agua se puede expresar como $W = m_t g$, donde m_t es la masa total del sistema tanque-agua (Ec. 2.23) y g es la aceleración debida a la gravedad. Se tuvo especial cuidado en representar el sistema tanque-agua con una cantidad suficiente de modos convectivos de vibración (N) con la finalidad de representar el 90% o más de masa participativa.

La Figura 2.4 muestra los porcentajes de masa participativa acumulada donde se puede observar que, considerando tres modos ($N = 3$) asociados al movimiento convectivo se logra representar más del 99% de masa participativa para valores H/R (razón altura de agua-radio interior del tanque) mayores o iguales a 0.5, y considerando cinco modos ($N = 5$) se logra representar más del 99% de masa participativa para todos los casos (cualquier H/R).

$$m_t = m_0 + \sum_{j=1}^{\infty} m_j + m_b \quad (2.23)$$

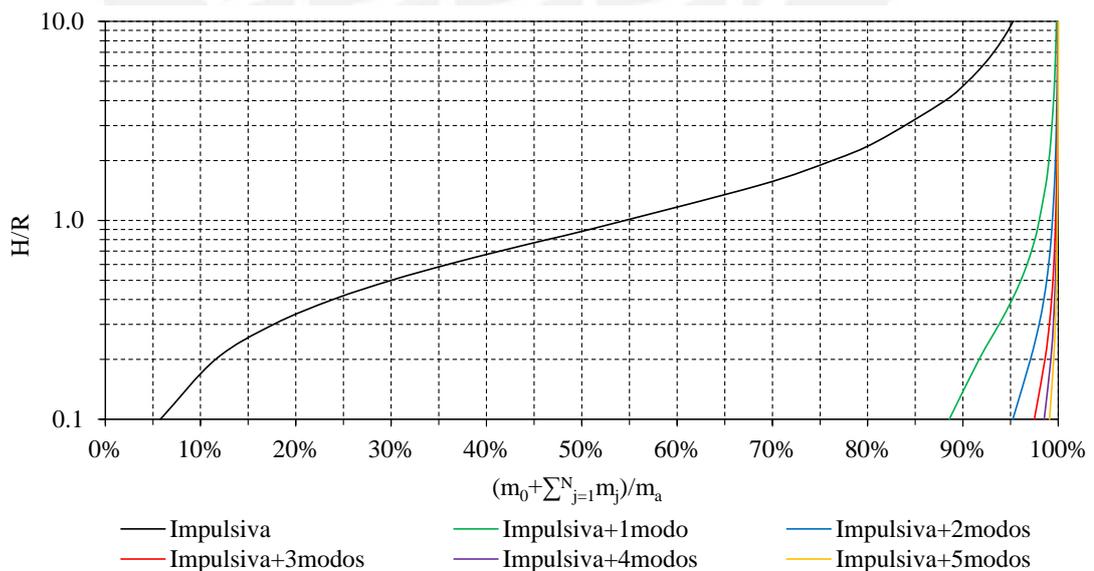


Figura 2.4 Porcentajes de masas participativas modales acumuladas.

2.2 MODELO DEL SISTEMA DE AISLACIÓN

Para el análisis de la respuesta del sistema de aislación de comportamiento inelástico no lineal lateral bajo sollicitación sísmica uni- y bi-direccional del movimiento del suelo se utilizó un modelo histerético del tipo bi-axial, donde las fuerzas de restitución histeréticas son modeladas por ecuaciones diferenciales no lineales acopladas.

La Figura 2.5 muestra un aislador del tipo FPS, que consiste en un deslizador de teflón articulado que se desliza a lo largo de una superficie cóncava esférica de acero inoxidable. El valor y la dirección de la fuerza de fricción que se moviliza durante el movimiento de estos aisladores dependen de la carga normal, presión en el aislador, velocidad de deslizamiento, y la dirección del deslizamiento (Zayas *et al.*, 1987; Mokha *et al.*, 1993; Constantinou *et al.*, 1990; Hwang *et al.*, 1990).



Figura 2.5 Aislador del tipo FPS.

Fuente: EPS, 2014

2.2.1 Modelo Bi-Axial

La sollicitación sísmica horizontal del suelo es bi-direccional, y las fuerzas de restitución en direcciones ortogonales horizontales interactúan con los desplazamientos horizontales del sistema de aislación, por lo tanto es necesario describir el acoplamiento de las fuerzas bi-axiales a través de un modelo histerético del tipo bi-axial.

La Figura 2.6 muestra el modelo del sistema de aislación del tipo FPS, que representa el comportamiento histerético fuerza-desplazamiento en las direcciones ortogonales horizontales.

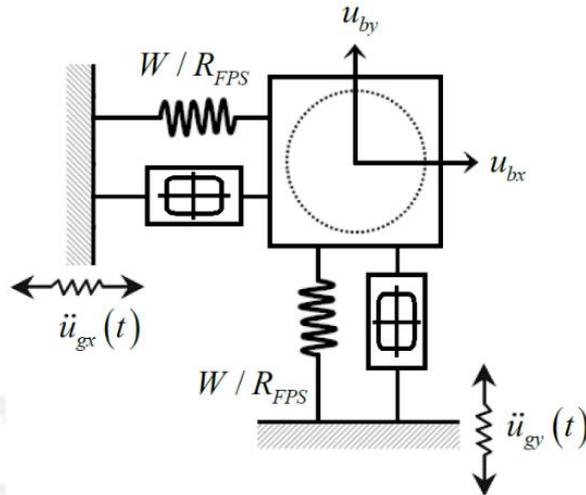


Figura 2.6 Modelo histerético del sistema de aislación del tipo FPS (vista en planta).

Las fuerzas de restitución del sistema de aislación están dadas por las Ecs. (2.24) y (2.25), siendo F_{bx} y F_{by} las fuerzas de restitución en las direcciones x e y , respectivamente; μ_b el coeficiente de fricción del sistema de aislación; W el peso total del sistema tanque-agua; R_{FPS} es el radio de curvatura del sistema de aislación; u_{bx} y u_{by} los desplazamientos laterales del sistema de aislación relativos al suelo en las direcciones x e y , respectivamente; Z_{hx} y Z_{hy} representan las componentes histeréticas de las fuerzas de restitución en las direcciones x e y , respectivamente; y \dot{u}_{gx} y \dot{u}_{gy} son las aceleraciones horizontales del suelo en las direcciones x e y , respectivamente (Zayas *et al.*, 1987; Constantinou *et al.* 1990).

$$F_{bx} = \frac{W}{R_{FPS}} u_{bx} + \mu_b W Z_{hx} \quad (2.24)$$

$$F_{by} = \frac{W}{R_{FPS}} u_{by} + \mu_b W Z_{hy} \quad (2.25)$$

El coeficiente de fricción es modelado por la Ec. (2.26), en la que f_{min} y f_{max} describen a los coeficientes de fricción a velocidades de deslizamiento pequeñas y grandes bajo presión constante, respectivamente; a es el coeficiente que controla la dependencia de la fricción sobre la velocidad de deslizamiento; \dot{u}_b^* es la velocidad instantánea de deslizamiento dada por la Ec. (2.27), en la que \dot{u}_{bx} y \dot{u}_{by} representan las velocidades de deslizamiento en las direcciones x e y respectivamente (Mokha *et al.*, 1990; Fenz y Constantinou, 2008; Kumar *et al.*, 2015).

$$\mu_b = f_{max} - (f_{max} - f_{min})e^{-a|\dot{u}_b^*|} \quad (2.26)$$

$$\dot{u}_b^* = \sqrt{\dot{u}_{bx}^2 + \dot{u}_{by}^2} \quad (2.27)$$

La Figura 2.7 muestra la variación del coeficiente de fricción en función de la presión en el sistema de aislación, y la velocidad de deslizamiento (Constantinou *et al.*, 1990; Mokha *et al.*, 1993; Fenz y Constantinou, 2008).

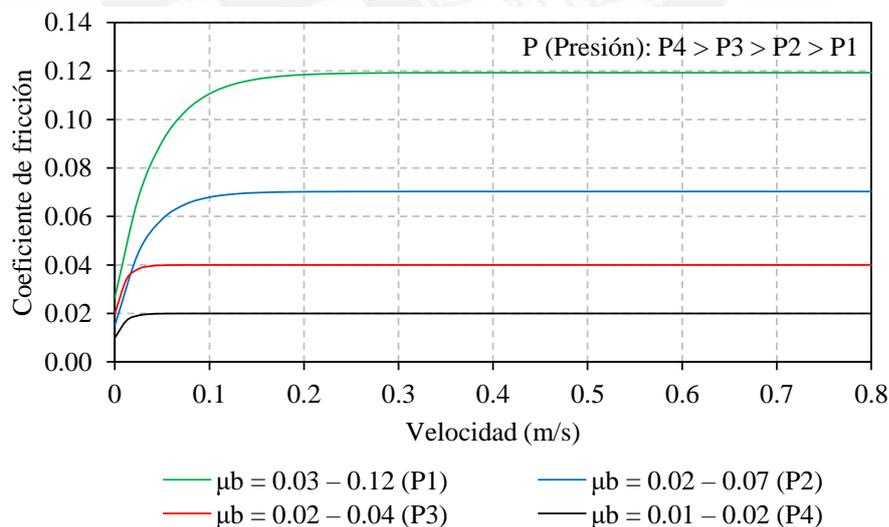


Figura 2.7 Variación del coeficiente de fricción del sistema de aislación del tipo FPS con la presión, y velocidad de deslizamiento.

Para fuerzas de restitución histeréticas isotrópicas, Z_{hx} y Z_{hy} satisfacen las ecuaciones diferenciales acopladas, Ecs. (2.28) y (2.29), en donde \dot{u}_{bx} y \dot{u}_{by} son

las velocidades laterales del sistema de aislación relativos al suelo en las direcciones x e y , respectivamente, A es un parámetro que controla la amplitud de la fuerza de restitución, y β y γ son parámetros que controlan la forma del lazo histerético, los valores de $A = 1$ y $\beta = \gamma = 0.5$ son usados en este trabajo (Wen, 1976; Park *et al.*, 1986; Nagarajaiah *et al.*, 1991; CSI, 2014). Además, Z_{hx} y Z_{hy} tienen valores iniciales iguales a cero, y cuyas condiciones de borde están dadas por la Ec. (2.30).

$$\mu_b R_{FPS} \dot{Z}_{hx} = A \dot{u}_{bx} - \beta |\dot{u}_{bx} Z_{hx}| Z_{hx} - \gamma \dot{u}_{bx} Z_{hx}^2 - \beta |\dot{u}_{by} Z_{hy}| Z_{hx} - \gamma \dot{u}_{by} Z_{hx} Z_{hy} \quad (2.28)$$

$$\mu_b R_{FPS} \dot{Z}_{hy} = A \dot{u}_{by} - \beta |\dot{u}_{by} Z_{hy}| Z_{hy} - \gamma \dot{u}_{by} Z_{hy}^2 - \beta |\dot{u}_{bx} Z_{hx}| Z_{hy} - \gamma \dot{u}_{bx} Z_{hx} Z_{hy} \quad (2.29)$$

$$\sqrt{Z_{hx}^2 + Z_{hy}^2} \leq 1 \quad (2.30)$$

Cabe señalar que en las Ecs. (2.28) y (2.29) los términos $-\beta |\dot{u}_{by} Z_{hy}| Z_{hx} - \gamma \dot{u}_{by} Z_{hx} Z_{hy}$ y $-\beta |\dot{u}_{bx} Z_{hx}| Z_{hy} - \gamma \dot{u}_{bx} Z_{hx} Z_{hy}$ proporcionan el acoplamiento o interacción entre las fuerzas de restitución del sistema de aislación del tipo FPS en las dos direcciones ortogonales, y son usadas para explicar las condiciones de separación y re inserción de la interfaces de deslizamiento. Por lo tanto es importante estudiar los efectos de esta interacción sobre la respuesta sísmica del sistema tanque-agua de base aislada con FPS bajo sollicitación sísmica bi-direccional compatible con un espectro de diseño.

2.2.2 Modelo Uni-Axial

Las formulaciones anteriores son una extensión de la fuerza de restitución histerética del tipo uni-axial (Bouc, 1971; Wen, 1976, 1980). El comportamiento histerético prescrito por las Ecs. (2.28) y (2.29) puede ser ilustrada por un recorrido simple de desplazamiento tal como se muestra en la Figura 2.8. En este caso, las variables de las Ecs. (2.28) y (2.29) son expresadas por las variables de la Ec. (2.31), en donde u_b y Z_h son el desplazamiento uni-axial y la componente histerética, respectivamente.

$$Z_{hx} = Z_h \cos \theta, \quad Z_{hy} = Z_h \sin \theta, \quad u_{bx} = u_b \cos \theta, \quad u_{by} = u_b \sin \theta \quad (2.31)$$

Sustituyendo la Ec. (2.31) dentro de las Ecs. (2.28) y (2.29), se puede mostrar que las Ecs. (2.28) y (2.29) se reducen a la Ec. (2.32). Que proporciona la relación histerética uni-axial (Wen, 1976, 1980), es decir, a lo largo del recorrido de desplazamiento mostrado en la Figura 2.8, el sistema tiene la propiedad histerética ilustrada en las Figuras 2.9 y 2.10. Lo mismo es válido para cualquier valor de θ ; por lo tanto, la fuerza de restitución es histerética e isotrópica, Ec. (2.33).

$$\mu_b R_{FPS} \dot{Z}_h = A \dot{u}_b - \beta |\dot{u}_b Z_h| Z_h - \gamma \dot{u}_b Z_h^2 \quad (2.32)$$

$$F_b = \frac{W}{R_{FPS}} u_b + \mu_b W Z_h \quad (2.33)$$

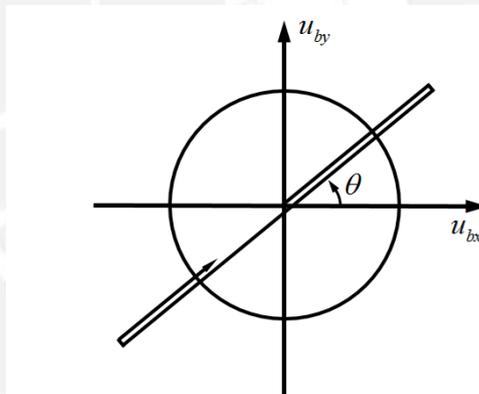


Figura 2.8 Recorrido del desplazamiento lineal del sistema de aislación en función de sus componentes en las direcciones x e y.

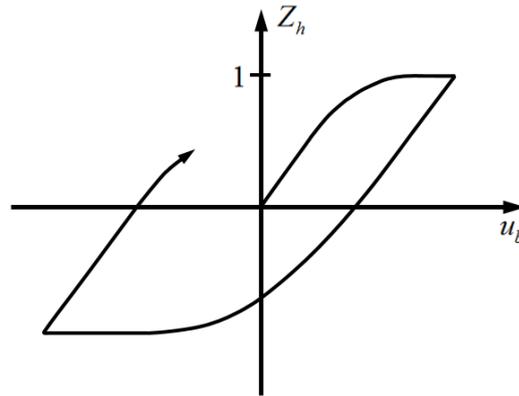


Figura 2.9 Comportamiento histerético componente histerética-desplazamiento del sistema de aislación.

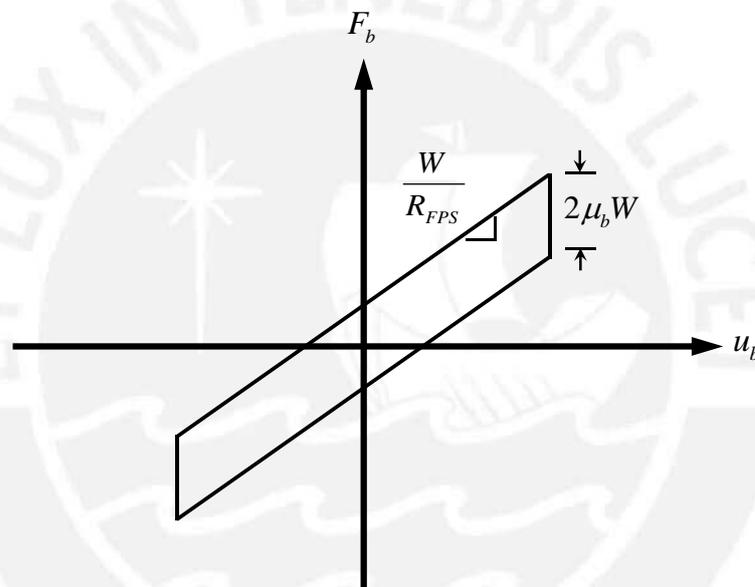


Figura 2.10 Comportamiento histerético fuerza-desplazamiento del sistema de aislación.

Bajo sollicitación sísmica uni-direccional ($\theta = 0$), movimiento en la dirección x sin ningún movimiento en la dirección y , para la fuerza de restitución histerética, Ec. (2.24), Z_{hx} satisface la ecuación diferencial, Ecs. (2.34).

$$\mu_b R_{FPS} \dot{Z}_{hx} = A \dot{u}_{bx} - \beta |\dot{u}_{bx} Z_{hx}| Z_{hx} - \gamma \dot{u}_{bx} Z_{hx}^2 \quad (2.34)$$

Bajo sollicitación sísmica uni-direccional ($\theta = 90^\circ$), movimiento en la dirección y sin ningún movimiento en la dirección x, para la fuerza de restitución histerética, Ec. (2.25), Z_{hy} satisface la ecuación diferencial, Ecs. (2.35).

$$\mu_b R_{FPS} \dot{Z}_{hy} = A \dot{u}_{by} - \beta |\dot{u}_{by} Z_{hy}| Z_{hy} - \gamma \dot{u}_{by} Z_{hy}^2 \quad (2.35)$$

Los valores de Z_{hx} y Z_{hy} están dentro del rango dado por las Ecs. (2.36) y (2.37).

$$Z_{hx} \leq 1 \quad (2.36)$$

$$Z_{hy} \leq 1 \quad (2.37)$$

2.3 PARÁMETROS DEL ANÁLISIS

2.3.1 Parámetros del Sistema Tanque-Agua

Se usaron dos parámetros que consideran las características geométricas del sistema tanque-agua: la razón entre la altura del agua y el radio interior del tanque (H/R), y la razón entre el espesor de la pared del tanque y el radio interior del tanque (e/R). Para el parámetro H/R se usarán los valores iguales a 0.5, 1.0, y 2.0 correspondientes a tanques poco esbeltos, medianos y esbeltos, respectivamente; y para el parámetro e/R , se usarán los valores iguales a 0.02, y 0.04 correspondientes a paredes delgadas y gruesas respectivamente.

Se usan estos valores debido a que son los más representativos en el diseño sísmico de tanques cilíndricos circulares de CA para almacenamiento de agua (Priestley *et al.*, 1986).

2.3.2 Parámetros del Sistema de Aislación del Tipo FPS

Se usaron dos parámetros que consideran las características geométricas y físicas del sistema de aislación del tipo FPS: el período objetivo de vibración del sistema de aislación (T_b), y el coeficiente de fricción del sistema de aislación (μ_b).

Para el parámetro T_b , Ec. (2.38), se usarán los valores iguales a 2, 3, y 4; y para el parámetro μ_b , Ec. (2.26), se usarán los valores iguales a 0.03 – 0.12, 0.02 – 0.07, 0.02 – 0.04, y 0.01 – 0.02.

Se usan estos valores debido a que son los más representativos para un sistema de aislación del tipo FPS (Constantinou *et al.*, 1990).

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{R_{FPS}}{g}} \quad (2.38)$$

Siendo R_{FPS} el radio de curvatura del sistema de aislación, y g la aceleración debida a la gravedad.

2.3.3 Casos de Estudio

Se consideraron 3 tipos de análisis, obteniéndose un total de 6 casos paramétricos de base fija, y 144 casos paramétricos de base aislada (Tabla 2.1 y 2.2). Finalmente, se adoptó emplear un valor de radio interior del tanque igual a $R = 10$ m, para todos los casos.

Tabla 2.1. Parámetros utilizados y valores asignados

| ID | Sistema tanque-agua | | Sistema de aislación del tipo FPS | |
|----|---------------------|-------|-----------------------------------|-------------|
| | H/R | e/R | T_b (s) | μ_b |
| 1 | 0.5 | 0.02 | 2 | 0.03 – 0.12 |
| 2 | 1.0 | 0.04 | 3 | 0.02 – 0.07 |
| 3 | 2.0 | --- | 4 | 0.02 – 0.04 |
| 4 | --- | --- | --- | 0.01 – 0.02 |

(---) No hay valor

Tabla 2.2. Número de casos por analizar

| Tipo de análisis | Casos |
|--------------------------------|------------|
| Base fija | 6 |
| Base aislada (uni-direccional) | 72 |
| Base aislada (bi-direccional) | 72 |
| Total | 150 |

En la Figura 2.11 se muestra el período fundamental de vibración del modo impulsivo del sistema tanque-agua, T_0 , en función del parámetro H/R para dos valores diferentes de e/R (ACI, 2006). Los resultados son comparados con el

RESPUESTA SÍSMICA DE TANQUES DE CONCRETO ARMADO PARA ALMACENAMIENTO DE AGUA APOYADOS SOBRE UN SISTEMA DE AISLACIÓN DEL TIPO PÉNDULO FRICCIONAL

período de vibración del modo impulsivo del sistema tanque-agua usando SAP2000, y asumiendo que actúa como una viga flexo-cortante en voladizo (solución analítica).

La Frecuencia natural circular de vibración correspondiente a la solución analítica está dada por la Ec. (2.39); en el que I es el momento de inercia de la sección transversal; A_g es el área de la sección transversal del tanque; ϕ es el factor de deformación cortante y está dada por la Ec. (2.40), donde A_s es el área de corte de la sección transversal, y $G_{CA} = E_{CA}/[2(1 + \nu_{CA})]$ es el módulo de corte del CA.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{12E_{CA}I}{h_0^3(4 + \phi)(m_0 + A_g h_0 \rho_{CA})}} \tag{2.39}$$

$$\phi = \frac{12E_{CA}I}{G_{CA}A_s h_0^2} \tag{2.40}$$

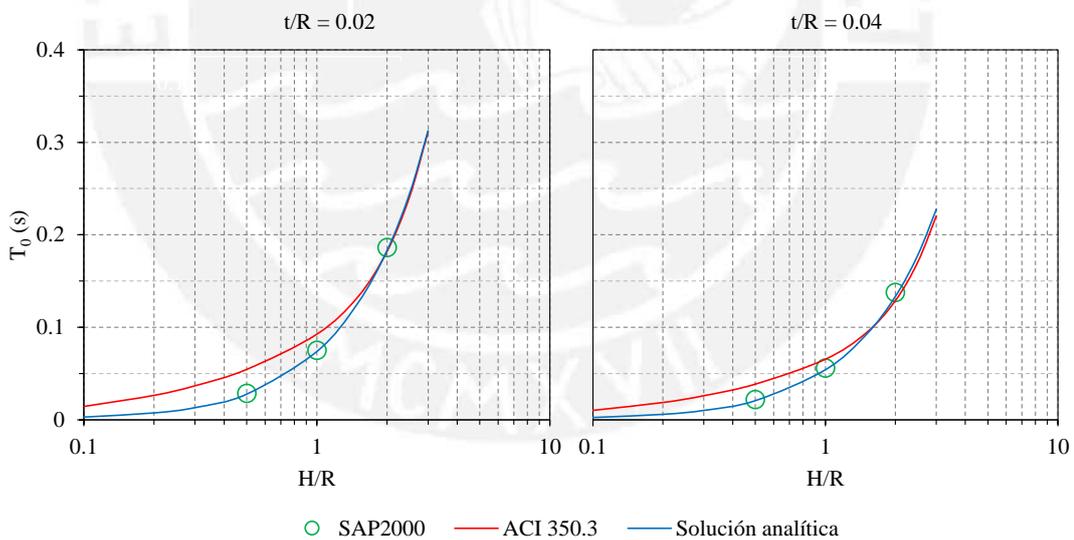


Figura 2.11 Período de vibración del modo impulsivo del sistema tanque-agua y comparación con una aproximación simple.

Como resultado, se pueden observar que pequeños períodos naturales impulsivos implican la rigidez relativa del tanque.

Comparando la solución analítica, del ACI 350.3, y del SAP2000, se puede observar que los resultados del SAP2000 están en estrecha cercanía con los calculados a través del ACI 350.3, verificando así que el modelo propuesto en el SAP2000 puede ser empleado con precisión para estudiar los sistemas tanque-agua.

La Frecuencia natural circular de vibración fundamental de la j -ésima masa convectiva, esta dada por la Ec. (2,41).

$$\omega_j = \sqrt{\left(\lambda_j \frac{g}{R}\right) \tanh\left(\lambda_j \frac{H}{R}\right)} \quad (2.41)$$

La Tabla 2.3 muestra los períodos de vibración natural de los modos impulsivo ($T_0 = 2\pi/\omega_0$) y convectivos ($T_j = 2\pi/\omega_j$) correspondientes a los parámetros del sistema tanque-agua.

Tabla 2.3. Períodos de vibración de los modos impulsivo y convectivos

| Parámetros del sistema tanque-agua | | SAP2000 | | | | ACI 350.3 | | | |
|------------------------------------|-------|-------------------|----------------------|-----------|-----------|-------------------|----------------------|-----------|-----------|
| | | Período impulsivo | Períodos convectivos | | | Período impulsivo | Períodos convectivos | | |
| | | | Modo1 | Modo2 | Modo3 | | Modo1 | Modo2 | Modo3 |
| H/R | e/R | T_0 (s) | T_1 (s) | T_2 (s) | T_3 (s) | T_0 (s) | T_1 (s) | T_2 (s) | T_3 (s) |
| 0.5 | 0.02 | 0.03 | 5.49 | 2.76 | 2.17 | 0.05 | 5.49 | --- | --- |
| 0.5 | 0.04 | 0.02 | 5.49 | 2.76 | 2.17 | 0.03 | 5.49 | --- | --- |
| 1.0 | 0.02 | 0.08 | 4.80 | 2.75 | 2.17 | 0.09 | 4.80 | --- | --- |
| 1.0 | 0.04 | 0.06 | 4.80 | 2.75 | 2.17 | 0.06 | 4.80 | --- | --- |
| 2.0 | 0.02 | 0.18 | 4.68 | 2.75 | 2.17 | 0.18 | 4.68 | --- | --- |
| 2.0 | 0.04 | 0.13 | 4.68 | 2.75 | 2.17 | 0.13 | 4.68 | --- | --- |

(---) No hay valor

La ecuación diferencial del movimiento para el sistema tanque-agua (superestructura) es expresada por la Ec. (3.1), en donde se asume que la base del tanque se comporta como un diafragma rígido en su plano apoyado sobre el sistema de aislación y la base del sistema de aislación se encuentran en contacto directo con la cimentación.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{R}(\ddot{\mathbf{u}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g) \quad (3.1)$$

Siendo \mathbf{M} , \mathbf{C} y \mathbf{K} las matrices de masa (diagonal), de amortiguamiento y de rigidez de la superestructura; \mathbf{R} es la matriz de influencia del sismo; $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, y \mathbf{u} representan los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento asociados a los grados de libertad (Figuras 2.3 y 3.1) relativos a la base del tanque, $\ddot{\mathbf{u}}_b$ es el vector de aceleración de la base del tanque relativo al suelo, y, $\ddot{\mathbf{u}}_g$ es el vector de aceleración del suelo.

La ecuación diferencial del movimiento para la base del tanque se expresa mediante la Ec. (3.2).

$$\mathbf{R}^T \mathbf{M} [\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{R}(\ddot{\mathbf{u}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g)] + \mathbf{M}_b(\ddot{\mathbf{u}}_b + \ddot{\mathbf{u}}_g) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{u}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{u}_b + \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

Donde \mathbf{M}_b es la matriz de masa (diagonal) de la base rígida del tanque, \mathbf{C}_b la matriz de amortiguamiento del sistema de aislación, \mathbf{K}_b la matriz de rigidez elástica del sistema de aislación, y \mathbf{f} el vector que contiene las fuerzas de restitución no lineales del sistema de aislación (Nagarajaiah *et al.*, 1991).

3.2 ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA

El término de la fuerza de restitución en las ecuaciones diferenciales del movimiento para un sistema elástico se modifica para reconocer el comportamiento inelástico del sistema de aislación. La relación fuerza-desplazamiento para el sistema de aislación sometido a deformaciones cíclicas es no lineal e histerético. La curva de carga inicial es no lineal en las amplitudes de deformación grandes y las curvas de descarga y carga difieren de la rama de carga inicial. Los experimentos con aisladores han proporcionado las relaciones fuerza-desplazamiento (o leyes constitutivas) apropiadas (Robinson, 1982; Constantinou

et al., 1990). Para los sistemas inelásticos la relación no lineal entre las fuerzas laterales y los desplazamientos laterales resultantes dependen de la trayectoria; es decir, dependen de si la deformación aumenta o disminuye durante el paso de tiempo. Por lo tanto el análisis de la historia de la respuesta no lineal en el tiempo requiere una solución numérica.

La formulación de las ecuaciones diferenciales no lineales, en particular del término no lineal, exige una gran cantidad de cálculos. La matriz de rigidez del sistema de aislación debe formularse de nuevo en cada instante de tiempo a partir de las matrices de rigidez tangente de los elementos correspondientes a la deformación presente y a su dependencia de la trayectoria (en cualquiera de las ramas de carga inicial, descarga o recarga de la relación fuerza-desplazamiento del elemento). La solución numérica de la ecuación diferencial de movimiento es exigente con la cantidad de cálculos necesarios en sistemas inelásticos, porque estas ecuaciones diferenciales acopladas deben resolverse en forma simultánea. Tales soluciones numéricas deben repetirse en cada paso de tiempo Δt , el cual debe ser muy corto, tan corto como para asegurar que el procedimiento numérico converja, se mantenga estable y dé resultados precisos.

Para el análisis riguroso sobre la historia de la respuesta no lineal debe seleccionarse un conjunto de movimientos del suelo compatibles con el espectro de diseño sísmico para el sitio; a pesar de que el poder computacional ha aumentado, el modelado inelástico sigue siendo un reto y el análisis riguroso sobre la historia de la respuesta no lineal sigue siendo exigente en términos del cálculo, en especial para los sistemas de base aislada (los cuales requieren un análisis tridimensional para representar el acoplamiento de los movimientos laterales) sometidos a dos componentes horizontales del movimiento del suelo; estos análisis deben repetirse para varias excitaciones debido a que es necesario considerar la gran variabilidad de la demanda por los posibles movimientos del suelo y la variabilidad que existe entre los diferentes registros de la respuesta; el modelo estructural debe ser tan sofisticado como para representar un sistema de base aislada, sobre todo el deterioro de su resistencia ante los desplazamientos grandes (Chopra, 2012).

3.2.1 Métodos de Solución

El enfoque más general para la solución de la respuesta dinámica de los sistemas de base fija y de base aislada es la integración numérica directa de las ecuaciones

de equilibrio dinámico en un punto discreto en el tiempo. Este análisis se inicia en la condición estática sin perturbaciones de la estructura y se repite para la duración de la entrada del movimiento del suelo con incrementos de tiempo iguales para obtener la historia de la respuesta estructural completa en el tiempo bajo una sollicitación específica.

Existen un gran número de métodos precisos, de orden superior, de múltiples pasos que se han desarrollado para la solución numérica de las ecuaciones diferenciales. Sin embargo, en sistemas de base aislada las ecuaciones diferenciales de movimiento que implican desplazamiento, velocidad y aceleración no pueden considerarse como funciones suaves debido a la histéresis no lineal del sistema de aislación. Por lo tanto, sólo se recomiendan métodos de un solo paso para la solución de las ecuaciones diferenciales de movimiento de sistemas de base aislada.

Los métodos de solución paso a paso intentan satisfacer el equilibrio dinámico en pasos de tiempo discretos y pueden requerir de iteraciones, sobre todo cuando el comportamiento no lineal se desarrolla en el sistema de aislación y la rigidez del sistema de base aislada debe de volverse a calcular debido a la degradación de la resistencia y la redistribución de las fuerzas. Diferentes técnicas numéricas han sido estudiadas por numerosos investigadores y son generalmente clasificados como métodos de integración explícita o implícita. Las consideraciones importantes para la selección adecuada del método de integración para una estructura particular son la estabilidad y la precisión de los resultados.

Los métodos explícitos de integración directa son muy rápidos, ya que no requieren iteración dentro de cada paso de tiempo. Permiten cualquier tipo de amortiguación y la no linealidad en el modelo; sin embargo, requieren muy pequeñas pasos de tiempo para obtener resultados estables y por lo tanto producirán datos de salida más grandes e innecesarios. Los métodos implícitos de integración directa de las ecuaciones diferenciales de movimiento requieren iteración en cada paso de tiempo para alcanzar el equilibrio, y son computacionalmente exigentes, para resolver grandes matrices dispersas. También permiten que cualquier tipo de amortiguamiento y no linealidad en el modelo estructural, y, además, toleran pasos de tiempo más grandes debido a la estabilidad incondicional en los resultados utilizando ciertos parámetros. Entre los métodos de integración implícitos tenemos el método de Newmark (Newmark,

1959) y el método de Hilber-Hughes-Taylor (Hilber *et al.*, 1977), recomendado para análisis no lineal

La solución modal de la ecuación diferencial de movimiento también es posible para sistemas elásticos lineales y en algunos casos resulta en una reducción del esfuerzo computacional y una precisión en los resultados del análisis. Sin embargo, la solución de la superposición modal no se debe utilizar para el análisis de sistemas de base aislada cuando se espera desarrollar un comportamiento no lineal en el sistema de aislación. Un tipo de superposición modal del análisis no lineal tiempo-historia es el análisis no lineal rápido (FNA, *Fast Nonlinear Analysis*). El FNA solo considera el comportamiento no lineal definido en ciertos elementos, y por lo tanto se recomienda el uso de este tipo de análisis para sistemas de base aislada (Wilson, 2002).

3.2.2 Método de Integración en el Tiempo

Los métodos de soluciones incrementales comunes usando un solo paso, procedimientos implícitos y estables son recomendados para estructuras no lineales sometidos a un movimiento sísmico.

3.2.2.1 Familia de Métodos de Newmark

Los métodos de integración de un solo paso (Newmark, 1959) han sido aplicados para el análisis dinámico de muchas estructuras de ingeniería bajo solicitaciones sísmicas. Además, han sido modificados y mejorados por muchos otros investigadores. Son posibles un gran número de métodos diferentes de integración numérica con sólo especificar diferentes parámetros de integración para el método de Newmark (Wilson, 2002).

El método de la aceleración promedio (constante) es el método más robusto para ser utilizado para el análisis dinámico paso a paso de los grandes sistemas estructurales complejos en las que están presentes un gran número de períodos cortos, debido a la estabilidad incondicional del algoritmo. El método de la aceleración promedio modificado se introdujo para reducir los errores numéricos y amortiguar la gran oscilación indefinida de las formas de los modos de período corto producidos en el método de la aceleración promedio durante el procedimiento de solución.

3.2.2.2 Método de Hilber-Hughes-Taylor

El esquema de integración Hilber-Hughes-Taylor (Hilber *et al.*, 1977) es un método implícito, incondicionalmente estable con propiedades de amortiguación numérica para reducir los altos modos de oscilación, mientras se logra una precisión de segundo orden de precisión cuando se utiliza para resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias de movimiento. El método de Hilber-Hughes-Taylor es una mejora general del método de la aceleración promedio de Newmark.

3.2.3 Solución Incremental de las Ecuaciones del Movimiento

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del sistema tanque-agua de base aislada con FPS no se pueden resolver utilizando las técnicas clásicas de superposición modal debido a que el comportamiento fuerza-desplazamiento del sistema de aislación es no lineal. Como resultado de ello, las ecuaciones que gobiernan el movimiento se resolverán de forma incremental usando métodos de integración numérica paso a paso en el tiempo de ecuaciones diferenciales.

Empleando la reducción modal, Ec. (3.3), siendo Φ la matriz modal normalizada con respecto a la matriz de masa, \mathbf{u}^* el vector de desplazamiento modal relativo a la base del tanque. Finalmente combinando las Ecs. (3.1), (3.2) y (3.3) se obtiene la Ec. (3.4), siendo Φ^T la transpuesta de la matriz Φ , ζ_i la razón de amortiguamiento crítico modal y ω_i la frecuencia natural circular del sistema de base fija en el i -ésimo modo. En la Ec. (3.4) las matrices $2\zeta_i \omega_i$ y ω_i^2 son diagonales. La Ec. (3.4) puede escribirse como la Ec. (3.5). En el tiempo $t + \Delta t$ la Ec. (3.4) puede escribirse como la Ec. (3.6).

$$\mathbf{u} = \Phi \mathbf{u}^* \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \Phi^T \mathbf{M} \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M} \Phi & \mathbf{R}^T \mathbf{M} \mathbf{R} + \mathbf{M}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}^* \\ \ddot{\mathbf{u}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\zeta_i \omega_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}^* \\ \dot{\mathbf{u}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_i^2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}^* \\ \mathbf{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Phi^T \mathbf{M} \mathbf{R} \\ \mathbf{R}^T \mathbf{M} \mathbf{R} + \mathbf{M}_b \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (3.4)$$

$$\tilde{\mathbf{M}} \ddot{\tilde{\mathbf{u}}}_t + \tilde{\mathbf{C}} \dot{\tilde{\mathbf{u}}}_t + \tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{u}}_t + \mathbf{f}_t = \tilde{\mathbf{P}}_t \quad (3.5)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{u}_{t+\Delta t} + \mathbf{f}_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{P}}_{t+\Delta t} \quad (3.6)$$

Finalmente la Ec. (3.4) puede escribirse en la forma incremental como la Ec. (3.7), donde $\tilde{\mathbf{M}}$, $\tilde{\mathbf{C}}$, $\tilde{\mathbf{K}}$, y $\tilde{\mathbf{P}}_t$ representan las matrices reducidas de masa, amortiguamiento, rigidez y sollicitación, Ec. (3.4), además, el estado de movimiento de la superestructura modal y la base del tanque está representado por los vectores $\ddot{\mathbf{u}}_t$, $\dot{\mathbf{u}}_t$ y \mathbf{u}_t , Ec. (3.4).

$$\tilde{\mathbf{M}}\Delta\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \tilde{\mathbf{C}}\Delta\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \tilde{\mathbf{K}}\Delta\mathbf{u}_{t+\Delta t} + \Delta\mathbf{f}_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{P}}_{t+\Delta t} - \tilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{u}}_t - \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{u}}_t - \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{u}_t - \mathbf{f}_t \quad (3.7)$$

El vector incremental de la fuerza no lineal $\Delta\mathbf{f}_{t+\Delta t}$ en la Ec. (3.7) es desconocido. Este vector es llevado al lado derecho de la Ec. (3.7) y es tratado como un vector de pseudo-fuerza. El algoritmo de solución implica la solución de la ecuación diferencial del movimiento usando el método de aceleración promedio (constante) de Newmark incondicionalmente estable y la solución de la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento no lineal del sistema de aislación usando el método de Runge-Kutta semi-implícito incondicionalmente estable (Rosenbrock, 1963), adecuado para la solución de ecuaciones diferenciales rígidas. Además, se empleó un procedimiento iterativo consistente de pseudo-fuerzas correctivas dentro de cada paso de tiempo hasta que el equilibrio sea alcanzado. Para la solución es usado el método de pseudo-fuerzas con iteración, donde esta es precisa y eficiente, especialmente para la solución de sistemas de base aislada (Nagarajaiah *et al.*, 1991; CSI, 2014).

3.3 SOLICITACIONES SÍSMICAS

3.3.1 Selección de los Registros Sísmicos

Se utilizaron un total de 21 pares de registros de movimientos sísmicos severos con magnitudes de momento, $M_w \geq 6.5$, correspondientes a suelos del tipo S_1 y del tipo S_2 (Tabla 3.1), los cuales fueron obtenidos de la base de datos de la Next Generation Attenuation Relationships for Western United States (NGA-West2, <http://ngawest2.berkeley.edu/>), de la Red de Acelerógrafos del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres

(REDACIS, <http://sig.cismid-uni.org/redacis>), y de la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (RENADIC-UCH, <http://www.renadic.cl/>). Las aceleraciones máximas del suelo (PGA, *peak ground acceleration*) de cada par de registros seleccionados se muestran en la Tabla 3.1. Las componentes de la aceleración, velocidad, y desplazamiento horizontal del suelo se muestran en el Anexo B.

Tabla 3.1. Movimientos sísmicos seleccionados

| ID | Terremoto | Año | Estación | M _w | Tipo de Suelo | PGA ¹ (g) | PGA ² (g) |
|----|-----------------------|------|------------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Imperial Valley-02 | 1940 | El Centro Array #9 | 6.9 | S ₂ | 0.28 | 0.21 |
| 2 | Kern Country | 1952 | Taft Lincoln School | 7.3 | S ₂ | 0.18 | 0.16 |
| 3 | Ancash | 1970 | Parque de la Reserva | 7.9 | S ₁ | 0.11 | 0.10 |
| 4 | Lima | 1974 | Parque de la Reserva | 8.0 | S ₁ | 0.18 | 0.17 |
| 5 | Montenegro | 1979 | Ulcinj-Hotel Albatros | 7.1 | S ₂ | 0.23 | 0.18 |
| 6 | Imperial Valley-06 | 1979 | Chihuahua | 6.5 | S ₂ | 0.27 | 0.25 |
| 7 | Corinth | 1981 | Corinth | 6.6 | S ₂ | 0.30 | 0.24 |
| 8 | Superstition Hills-02 | 1987 | Poe Road (temp) | 6.5 | S ₂ | 0.48 | 0.29 |
| 9 | Spitak | 1988 | Gukasian | 6.7 | S ₂ | 0.20 | 0.17 |
| 10 | Loma Prieta | 1989 | Gilroy Array #4 | 6.9 | S ₂ | 0.42 | 0.22 |
| 11 | Cape Mendocino | 1992 | Centerville Beach, Naval Fac | 7.0 | S ₂ | 0.48 | 0.32 |
| 12 | Landers | 1992 | Desert Hot Springs | 7.2 | S ₂ | 0.17 | 0.15 |
| 13 | Northridge-01 | 1994 | Canoga Park-Topanga Can | 6.6 | S ₂ | 0.39 | 0.36 |
| 14 | Kobe | 1995 | Takarazuka | 6.9 | S ₂ | 0.70 | 0.61 |
| 15 | Chi-Chi | 1999 | TCU072 | 7.6 | S ₂ | 0.48 | 0.38 |
| 16 | Sur del Perú | 2001 | César Vizcarra Vargas | 8.4 | S ₂ | 0.30 | 0.23 |
| 17 | Chuetsu-oki | 2007 | Sanjo Shinbori | 6.8 | S ₂ | 0.32 | 0.26 |
| 18 | Pisco | 2007 | UNICA | 8.0 | S ₂ | 0.34 | 0.29 |
| 19 | Darfield | 2010 | OXZ | 7.0 | S ₂ | 0.15 | 0.13 |
| 20 | El Mayor-Cucapah | 2010 | Michoacan de Ocampo | 7.2 | S ₂ | 0.54 | 0.41 |
| 21 | Maule | 2010 | Constitución | 8.8 | S ₂ | 0.65 | 0.53 |

(PGA¹) Aceleración máxima de la componente 1 del movimiento del suelo.

(PGA²) Aceleración máxima de la componente 2 del movimiento del suelo.

Nota: Los registros fueron obtenidos de la base de datos de la NGA-West2, REDACIS, y RENADIC-UCH.

3.3.2 Escalamiento de los Registros Sísmicos

Para un análisis tridimensional, los códigos de diseño (ASCE, 2010; MVCS, 2016) requieren que el promedio del espectro resultante (SR, *spectrum resultant*), definido como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS, *square root of the sum of the squares*), del conjunto seleccionado de pares de registros no sea

menor al espectro de diseño objetivo en un rango determinado de períodos. Esto se debe a que el espectro de diseño utilizado para seleccionar y modificar registros, se basa en los estudios de peligro sísmico de sitio. Por lo tanto, es importante que los registros utilizados en la simulación se modifiquen de tal manera que sus características se conserven tanto como sea posible. El enfoque de escalar los registros para cumplir con los códigos de diseño logra este objetivo ya que los registros mantienen sus propiedades a excepción de la amplitud que es modificada.

Los espectros de respuesta de cada par de registro seleccionado, fueron escalados (Figura 3.3) de tal manera que el SR promedio, se ajuste al espectro de diseño objetivo correspondiente a la zona sísmica 4 y suelo tipo S_2 para el sismo de diseño (DE, *design earthquake*) propuesto para el diseño de sistemas con aislación sísmica en el Perú (Mendo, 2015) en el dominio de períodos de vibración comprendido entre 0.01 s a 7.00 s, de tal manera que el error cuadrático medio (MSE, *mean squared error*) entre el SR promedio de los pares de registros sísmicos empleados y el espectro de diseño objetivo sea mínimo (Hachem, 2008; Mazzoni *et al.*, 2012).

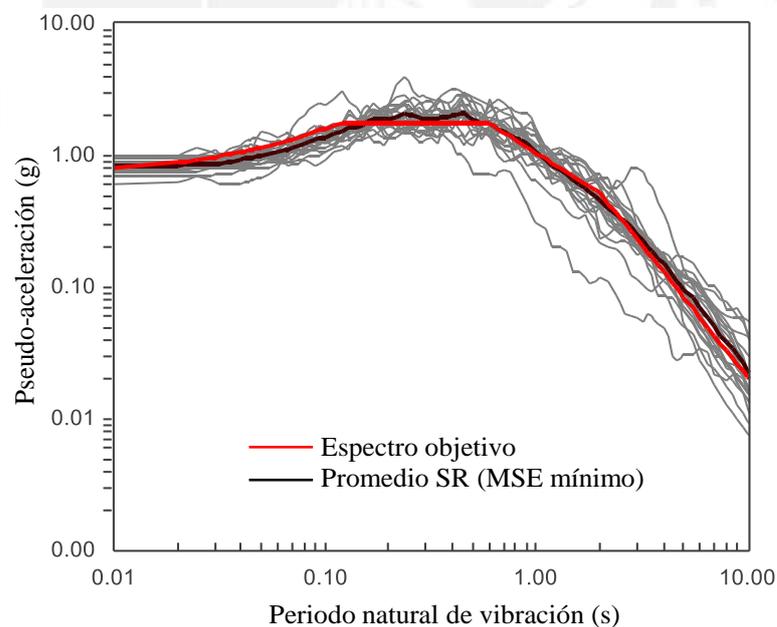


Figura 3.3 SR promedio escalado en amplitud para minimizar el MSE con respecto al espectro de diseño objetivo (razón de amortiguamiento crítico de 5%).

Los factores de escala obtenidos se muestran en la Tabla 3.2. Además, los espectros de Pseudo-aceleración, Pseudo-velocidad y desplazamiento se muestran en el Anexo C.

Tabla 3.2. Factores de escala

| ID | Terremoto | Año | Estación | Factor de escala |
|----|-----------------------|------|------------------------------|------------------|
| 1 | Imperial Valley-02 | 1940 | El Centro Array #9 | 2.27 |
| 2 | Kern Country | 1952 | Taft Lincoln School | 3.68 |
| 3 | Ancash | 1970 | Parque de la Reserva | 4.00 |
| 4 | Lima | 1974 | Parque de la Reserva | 4.00 |
| 5 | Montenegro | 1979 | Ulcinj-Hotel Albatros | 2.63 |
| 6 | Imperial Valley-06 | 1979 | Chihuahua | 2.36 |
| 7 | Corinth | 1981 | Corinth | 2.58 |
| 8 | Superstition Hills-02 | 1987 | Poe Road (temp) | 1.79 |
| 9 | Spitak | 1988 | Gukasian | 3.31 |
| 10 | Loma Prieta | 1989 | Gilroy Array #4 | 2.02 |
| 11 | Cape Mendocino | 1992 | Centerville Beach, Naval Fac | 1.47 |
| 12 | Landers | 1992 | Desert Hot Springs | 3.67 |
| 13 | Northridge-01 | 1994 | Canoga Park-Topanga Can | 1.50 |
| 14 | Kobe | 1995 | Takarazuka | 0.95 |
| 15 | Chi-Chi | 1999 | TCU072 | 1.23 |
| 16 | Sur del Perú | 2001 | César Vizcarra Vargas | 2.29 |
| 17 | Chuetsu-oki | 2007 | Sanjo Shinbori | 2.01 |
| 18 | Pisco | 2007 | UNICA | 1.60 |
| 19 | Darfield | 2010 | OXZ | 4.00 |
| 20 | El Mayor-Cucapah | 2010 | Michoacan de Ocampo | 1.22 |
| 21 | Maule | 2010 | Constitución | 0.97 |

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los sistemas tanque-agua de base fija y de base aislada desarrollados para este estudio, se han modelado usando el programa de análisis estructural SAP2000 (CSI, 2014), los modelos se muestran en el Anexo D. Los sistemas tanque-agua se han modelado utilizando elementos Shell (pared y base del tanque), elementos lineales LLink (uniones entre las masas convectivas e impulsiva del agua con las paredes del tanque), y finalmente los sistemas de aislación se han modelado utilizando elementos no lineales NLLink (aislador del tipo FPS).

En el presente estudio, para la excitación sísmica uni-direccional, las dos componentes, del movimiento del suelo, seleccionado y escalado (Tabla 3.1 y 3.2) fueron aplicados independientemente uno del otro. La componente 1 fue aplicada en la dirección x sin ningún movimiento en la dirección y . La componente 2 fue aplicada en la dirección y sin ningún movimiento en la dirección x . Finalmente, para la excitación sísmica bi-direccional, las dos componentes fueron aplicados simultáneamente, donde \ddot{u}_{gx} y \ddot{u}_{gy} son las aceleraciones horizontales del suelo en las direcciones x e y , respectivamente (Figuras 3.1 y 3.2).

Las respuestas sísmicas de interés son la fuerza cortante basal, el momento volcante de las paredes, el desplazamiento lateral de la base del tanque, y el desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*), donde S_x y S_y representan las fuerzas cortantes basales en las direcciones x e y respectivamente; M_{yx} representa el momento volcante de las paredes en la dirección y debido a las fuerzas producidas en la dirección x , y M_{xy} representa el momento volcante de las paredes en la dirección x debido a las fuerzas producidas en la dirección y ; u_{bx} y u_{by} representan los desplazamientos laterales de la base del tanque relativos al suelo en las direcciones x e y respectivamente. Además, $d_{cx} = \sum_{j=1}^N u_{jx} \lambda_j \varepsilon_j \tanh(\lambda_j H/R)$ y $d_{cy} = \sum_{j=1}^N u_{jy} \lambda_j \varepsilon_j \tanh(\lambda_j H/R)$ representan los desplazamientos verticales del oleaje de la superficie libre del agua en el contacto con la pared del tanque a lo largo de las direcciones x e y respectivamente, siendo u_{jx} y u_{jy} los desplazamientos laterales relativos a la base del tanque asociados a m_j en las direcciones x e y respectivamente.

Para estimar la respuesta sísmica de diseño asociada a un caso de estudio, se utilizó el valor promedio de las respuestas sísmicas, obtenidas de los análisis tiempo-historia (CSI, 2014) empleando los 21 pares de registros sísmicos del movimiento del suelo seleccionados y escalados de acuerdo al procedimiento

mostrado (Mendo, 2015; ASCE, 2010). Las respuestas sísmicas promedio se muestran en el Anexo E.

4.1 EFECTO DEL MOVIMIENTO BI-DIRECCIONAL

Las Figuras 4.1 y 4.2 muestran la variación en el tiempo de la fuerza cortante basal, el momento volcante de las paredes, el desplazamiento lateral de la base del tanque y el desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*) del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en las direcciones x e y , respectivamente, bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados). Se puede observar que el efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de los sistemas de base aislada no es muy significativo para este caso particular. Esto se debe a la existencia de la interacción bi-direccional entre las componentes ortogonales de las fuerzas de fricción en la interfaz del aislador, en donde el coeficiente de fricción depende de la velocidad y dirección de deslizamiento.

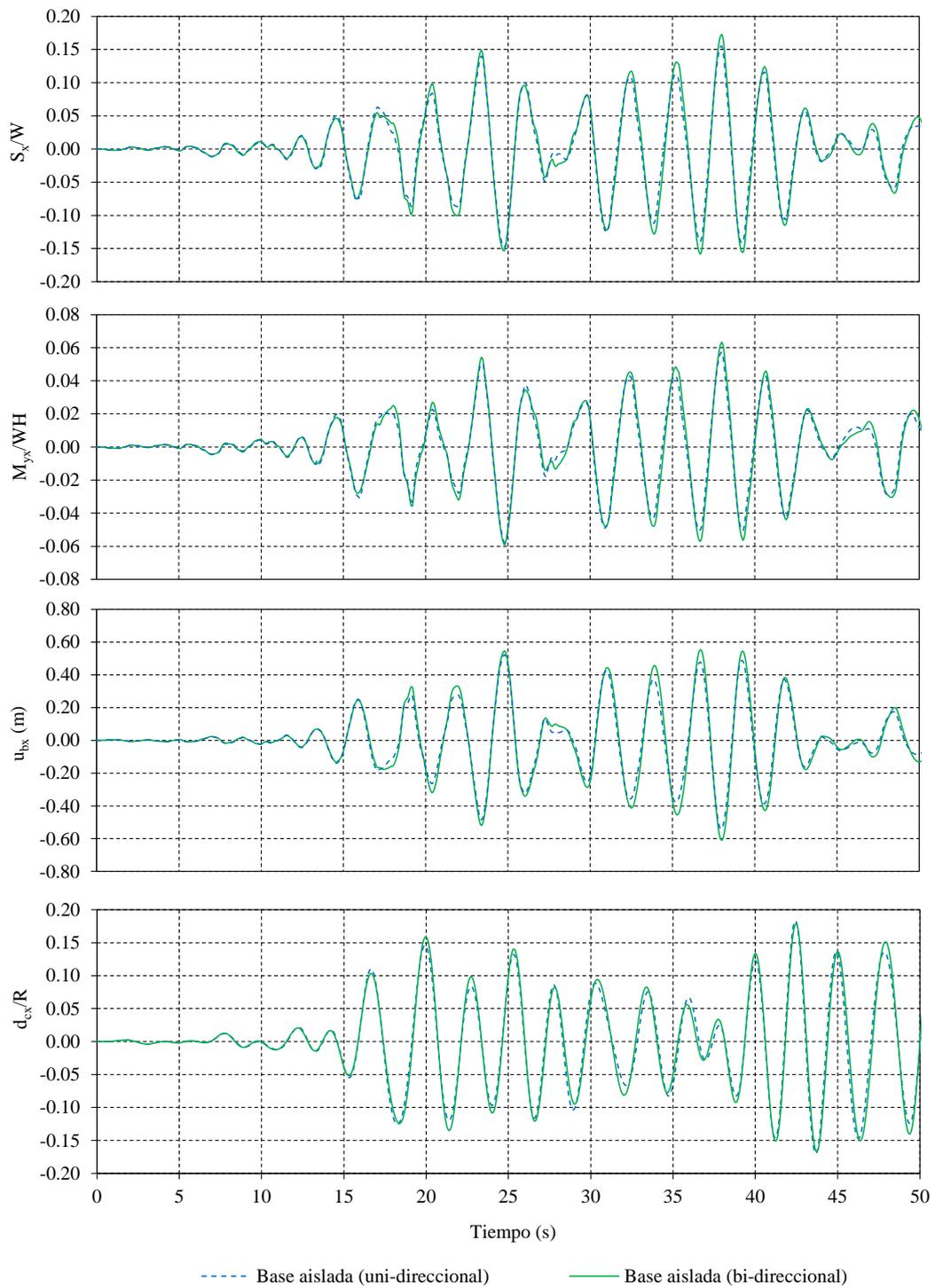


Figura 4.1 Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección x debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados).

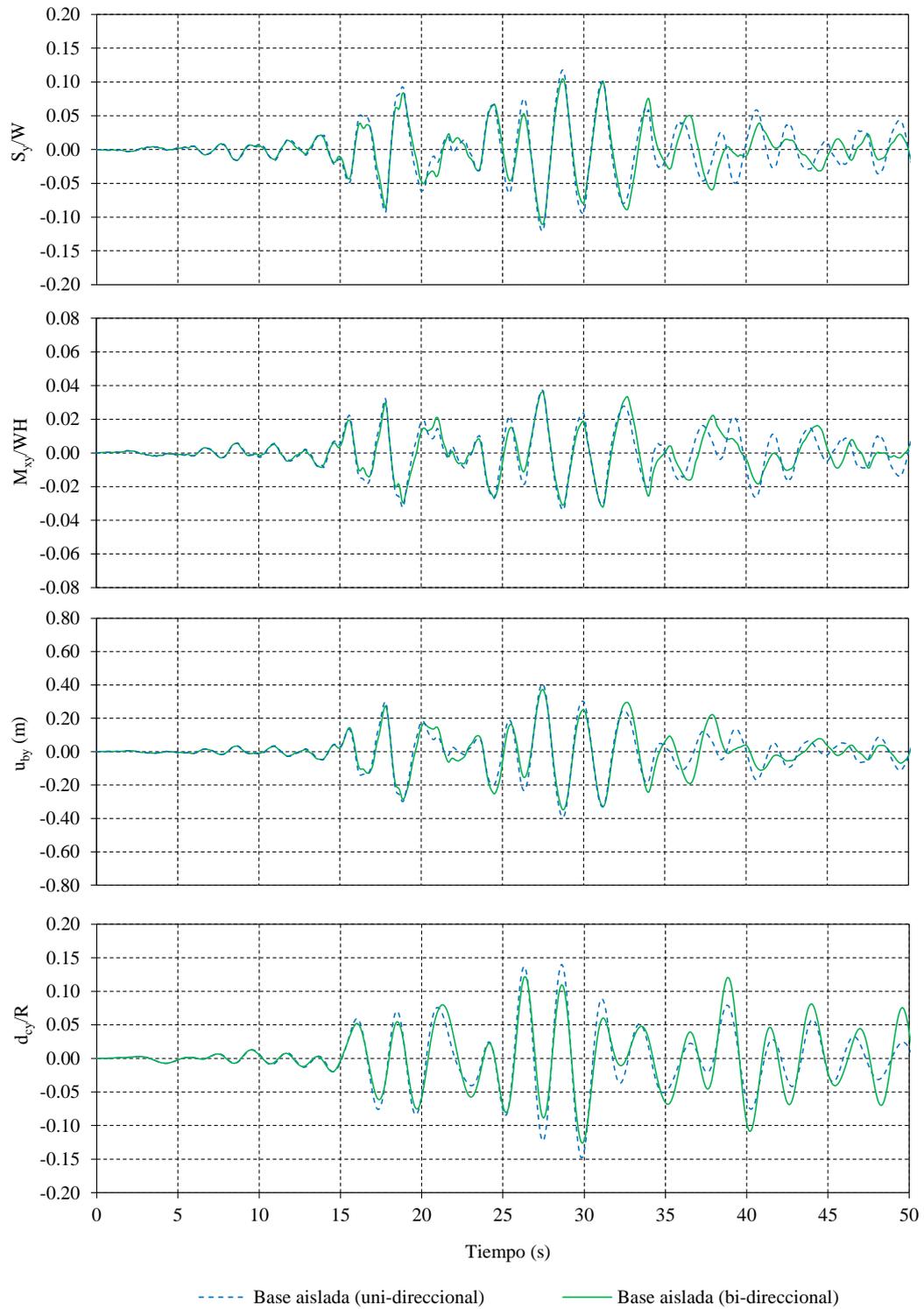


Figura 4.2 Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección y debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados).

Por otra parte la Figura 4.3 muestra la relación fuerza-desplazamiento bi-dimensional del sistema de aislación del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$), bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados). Se puede observar que el efecto del movimiento bi-direccional sobre el comportamiento inelástico no lineal fuerza-desplazamiento del sistema de aislación no es muy significativo.

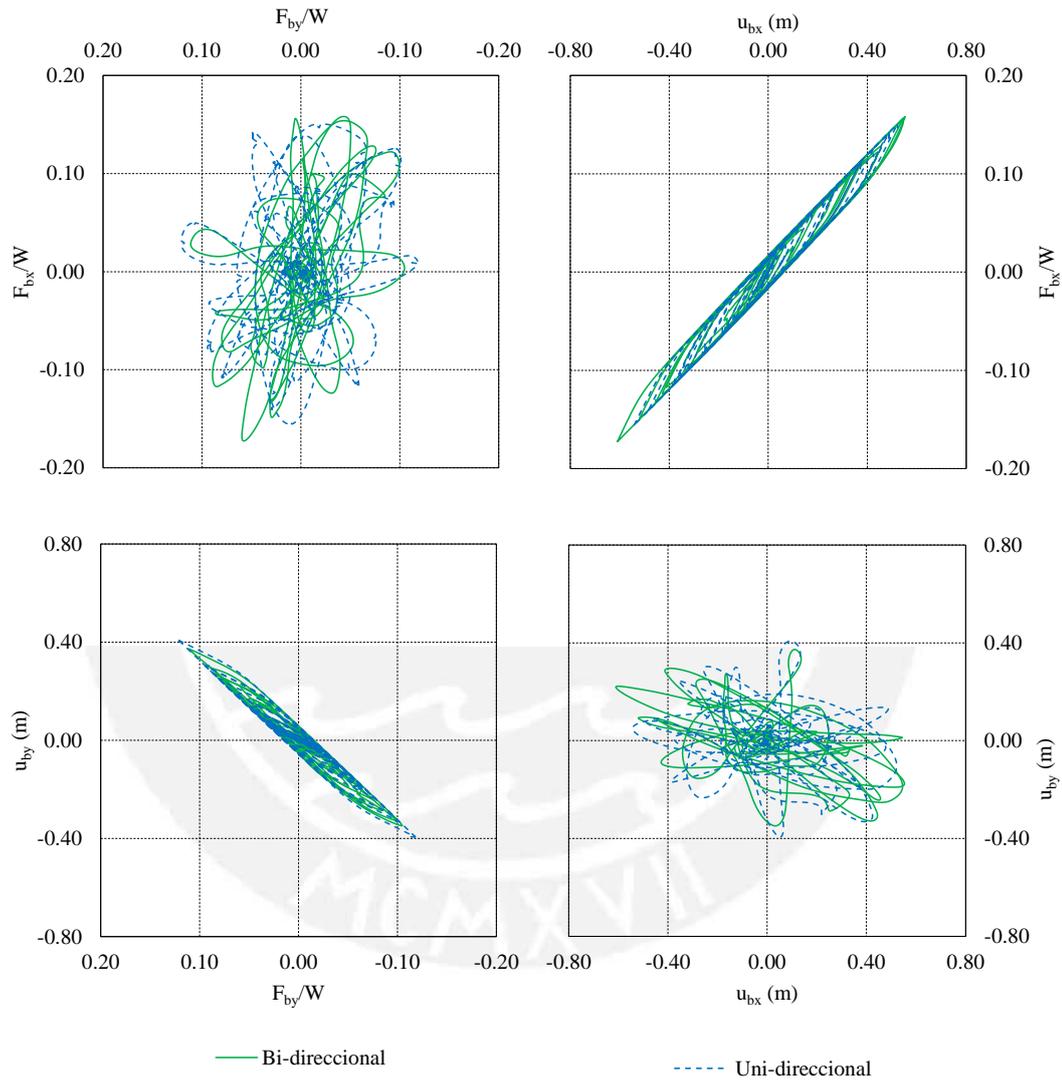


Figura 4.3 Comportamiento fuerza-desplazamiento del sistema de aislación del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados).

La Figura 4.4 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional. Además, al despreciar el efecto del movimiento bi-direccional, da lugar a las siguientes observaciones:

- El error en la fuerza cortante basal, varía de -1% a 10% para $H/R = 0.5$; de 0% a 9% para $H/R = 1.0$; de -1% a 7% para $H/R = 2.0$.
- El error en el momento volcante de las paredes, varía de 0% a 8% para $H/R = 0.5$; de 0% a 9% para $H/R = 1.0$; de -1% a 16% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento lateral de la base del tanque, varía de -3% a 10% para $H/R = 0.5$; de -2% a 9% para $H/R = 1.0$; de -2% a 7% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento vertical del oleaje, varía de -1% a 8% para $H/R = 0.5$; de -2% a 9% para $H/R = 1.0$; de -3% a 9% para $H/R = 2.0$.

La Figura 4.5 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.04$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional. Además, al despreciar el efecto del movimiento bi-direccional, da lugar a las siguientes observaciones:

- El error en la fuerza cortante basal, varía de -2% a 8% para $H/R = 0.5$; de -1% a 10% para $H/R = 1.0$; de -1% a 7% para $H/R = 2.0$.
- El error en el momento volcante de las paredes, varía de -1% a 8% para $H/R = 0.5$; de -1% a 11% para $H/R = 1.0$; de -2% a 15% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento lateral de la base del tanque, varía de -4% a 8% para $H/R = 0.5$; de -4% a 10% para $H/R = 1.0$; de -3% a 6% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento vertical del oleaje, varía de -1% a 9% para $H/R = 0.5$; de -3% a 9% para $H/R = 1.0$; de -3% a 9% para $H/R = 2.0$.

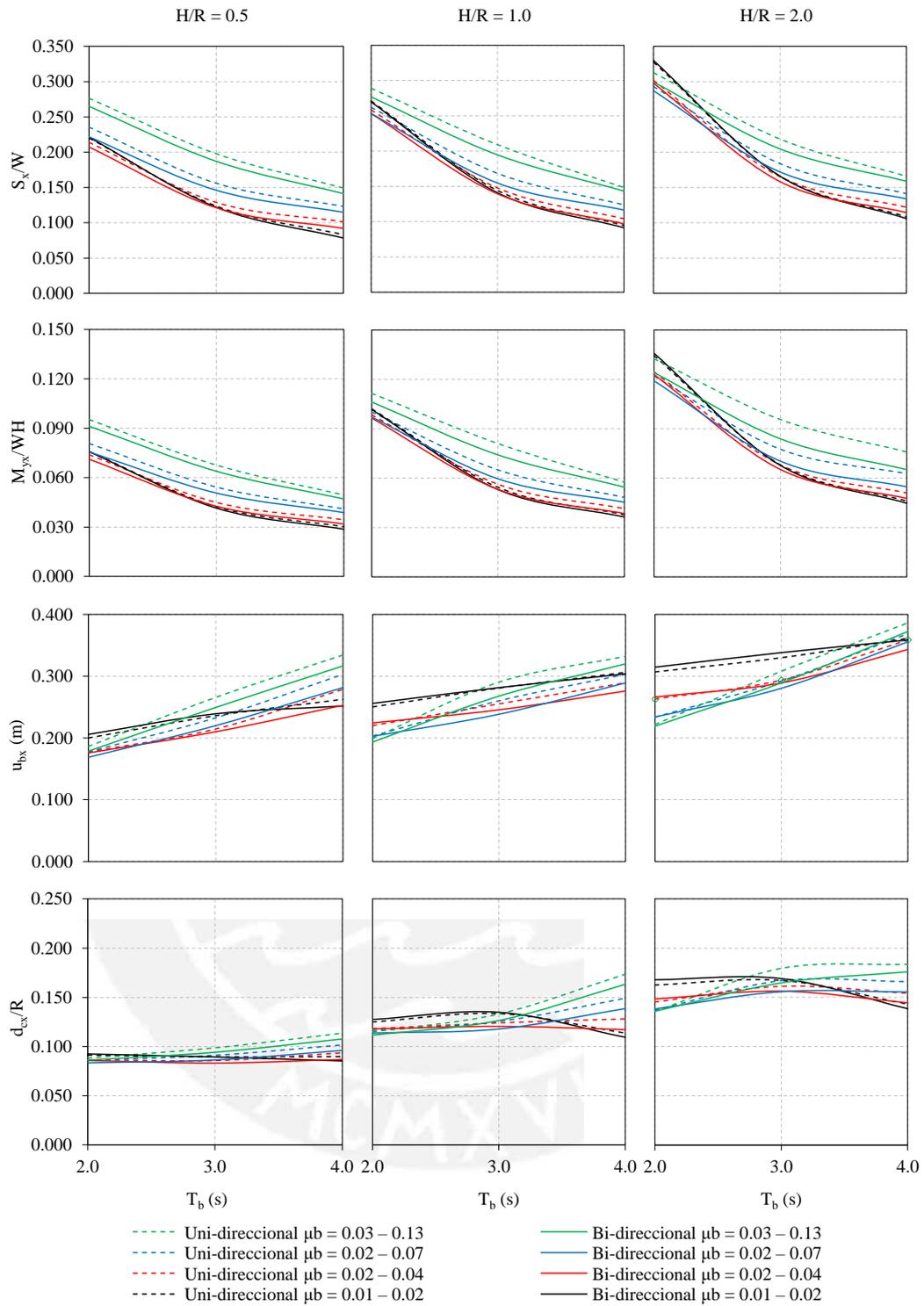


Figura 4.4 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$.

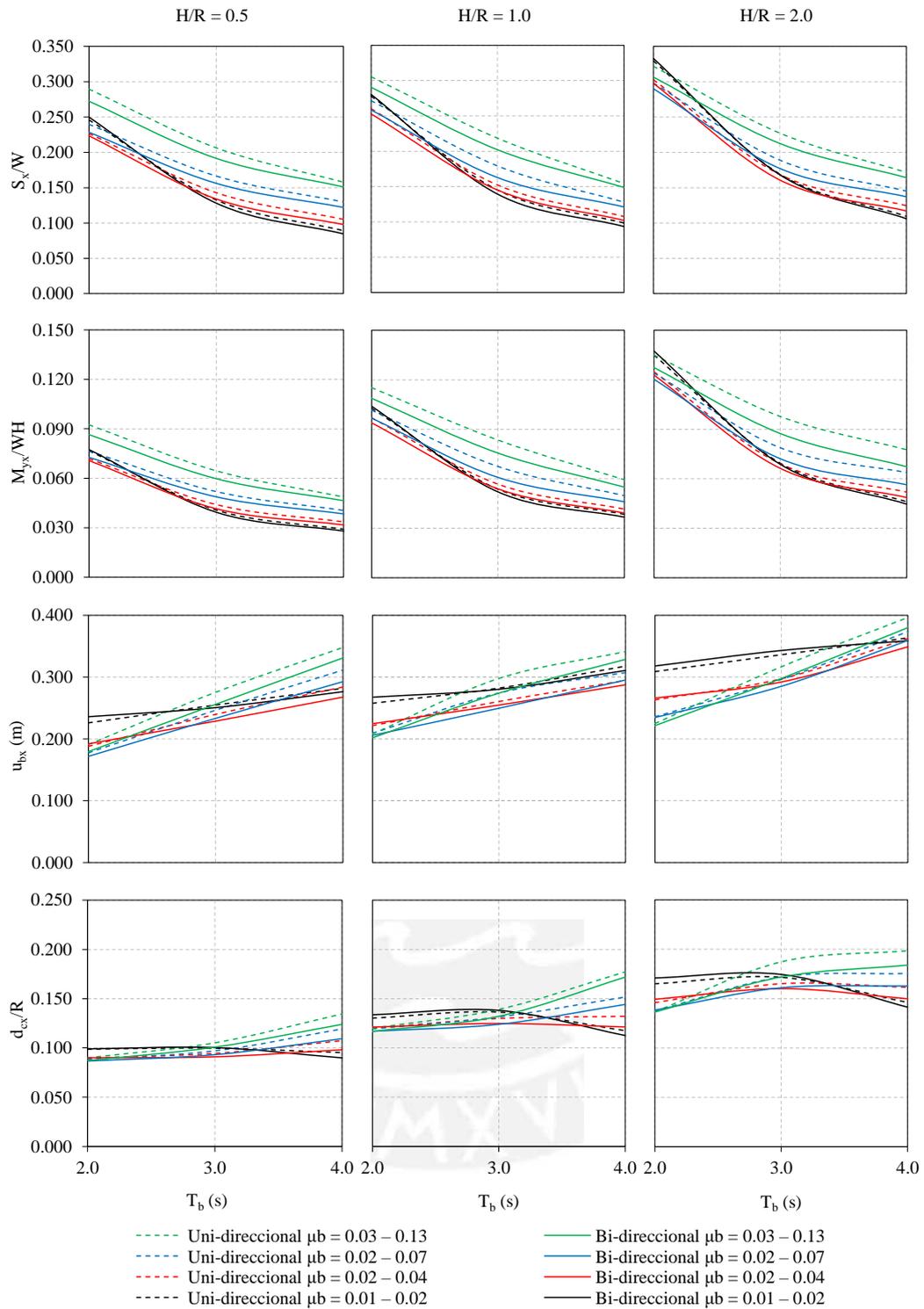


Figura 4.5 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$.

La Figura 4.6 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional. Además, al despreciar el efecto del movimiento bi-direccional, da lugar a las siguientes observaciones:

- El error en la fuerza cortante basal, varía de 2% a 11% para $H/R = 0.5$; de 0% a 14% para $H/R = 1.0$; de 1% a 14% para $H/R = 2.0$.
- El error en el momento volcante de las paredes, varía de 2% a 10% para $H/R = 0.5$; de 0% a 12% para $H/R = 1.0$; de 1% a 21% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento lateral de la base del tanque, varía de -1% a 9% para $H/R = 0.5$; de -2% a 12% para $H/R = 1.0$; de -2% a 13% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento vertical del oleaje, varía de -1% a 3% para $H/R = 0.5$; de -2% a 9% para $H/R = 1.0$; de -2% a 7% para $H/R = 2.0$.

La Figura 4.7 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.04$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional. Además, al despreciar el efecto del movimiento bi-direccional, da lugar a las siguientes observaciones:

- El error en la fuerza cortante basal, varía de 4% a 10% para $H/R = 0.5$; de 1% a 9% para $H/R = 1.0$; de -3% a 9% para $H/R = 2.0$.
- El error en el momento volcante de las paredes, varía de 1% a 11% para $H/R = 0.5$; de 0% a 12% para $H/R = 1.0$; de 0% a 20% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento lateral de la base del tanque, varía de -3% a 11% para $H/R = 0.5$; de -2% a 10% para $H/R = 1.0$; de -2% a 13% para $H/R = 2.0$.
- El error en el desplazamiento vertical del oleaje, varía de -1% a 5% para $H/R = 0.5$; de -2% a 9% para $H/R = 1.0$; de -2% a 8% para $H/R = 2.0$.

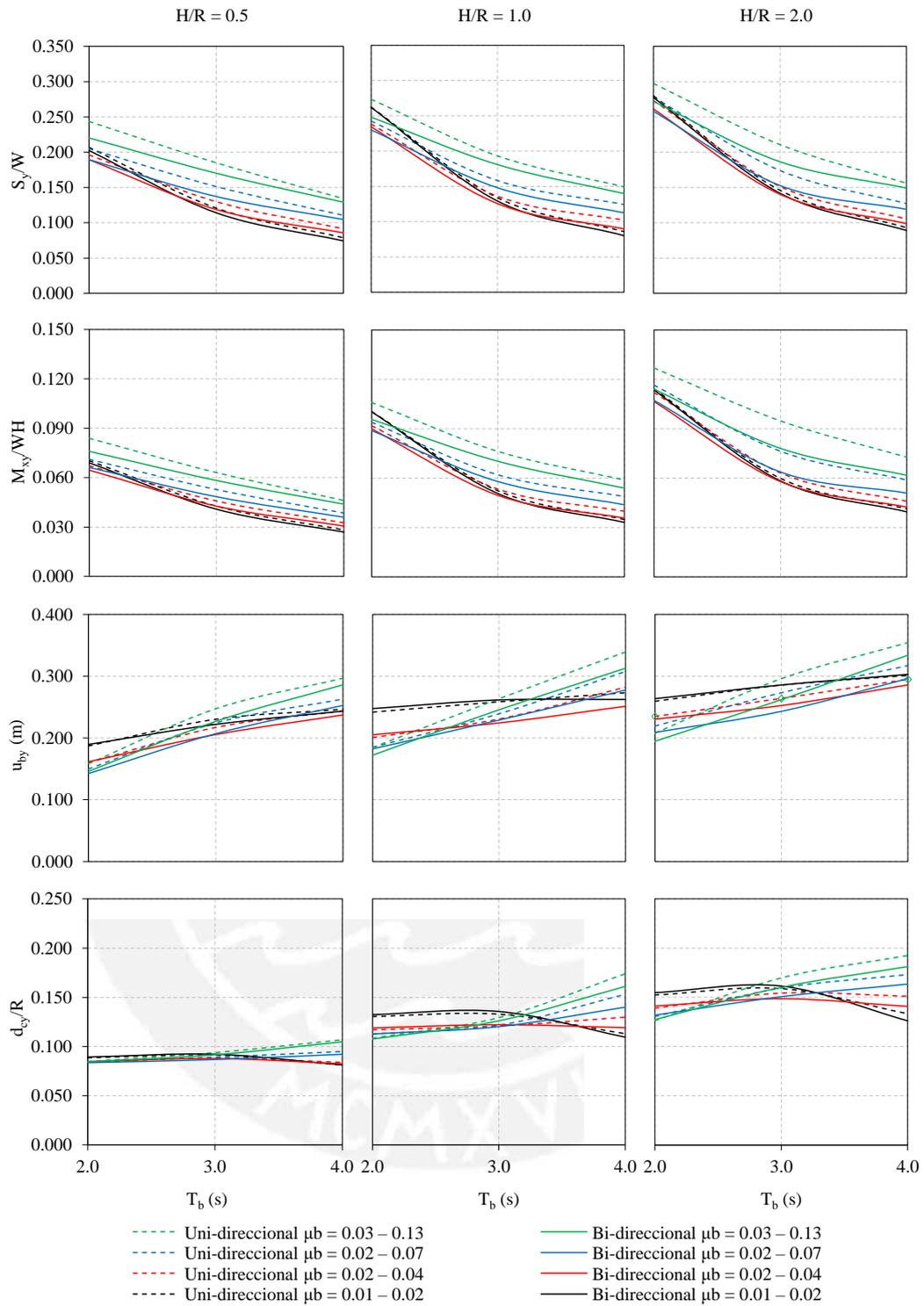


Figura 4.6 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$.

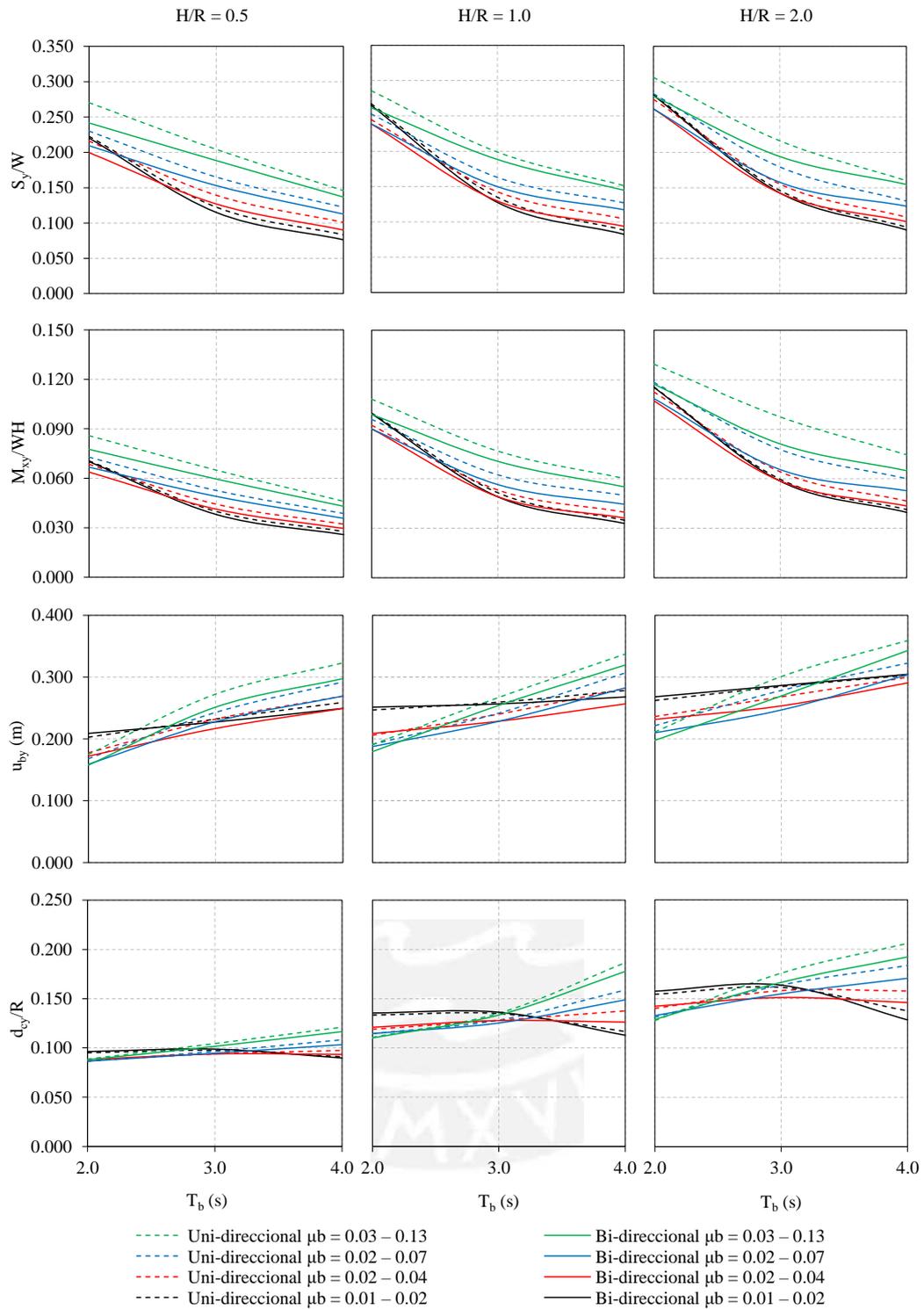


Figura 4.7 Efecto del movimiento bi-direccional sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base aislada con $e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$.

4.2 EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DEL ANÁLISIS

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran la variación en el tiempo de la fuerza cortante basal, el momento volcante de las paredes, el desplazamiento lateral de la base del tanque y el desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*) del sistema de base fija ($H/R = 1.0$, y $e/R = 0.02$) y del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en las direcciones x e y , respectivamente, bajo excitación sísmica uni- y bi-direccional debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados). Se puede observar que el sistema de aislación utilizado es efectivo en la reducción de la fuerza cortante basal máxima, y el momento volcante de las paredes máximo en comparación con el sistema de base fija.



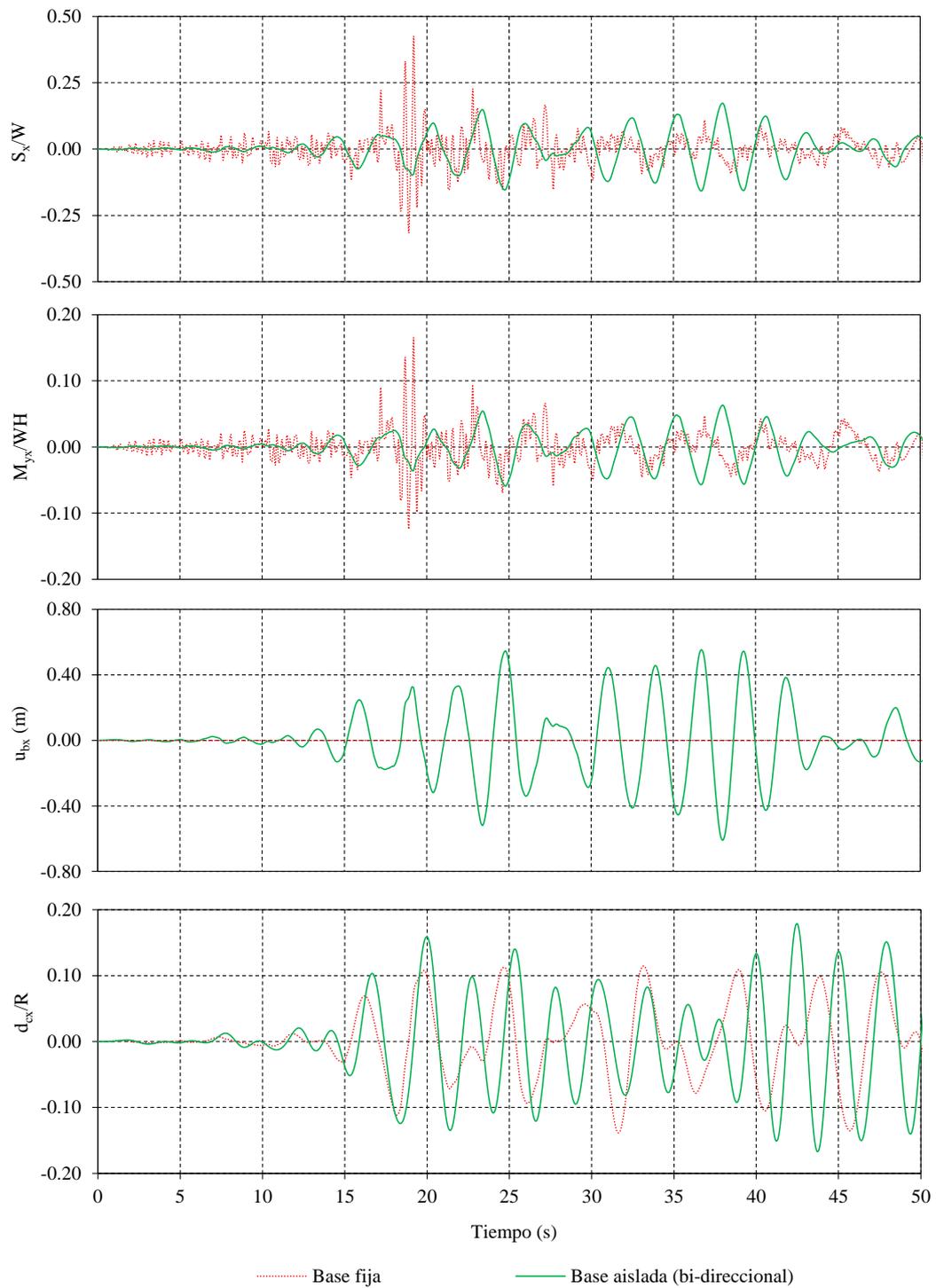


Figura 4.8 Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base fija y del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección x debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados).

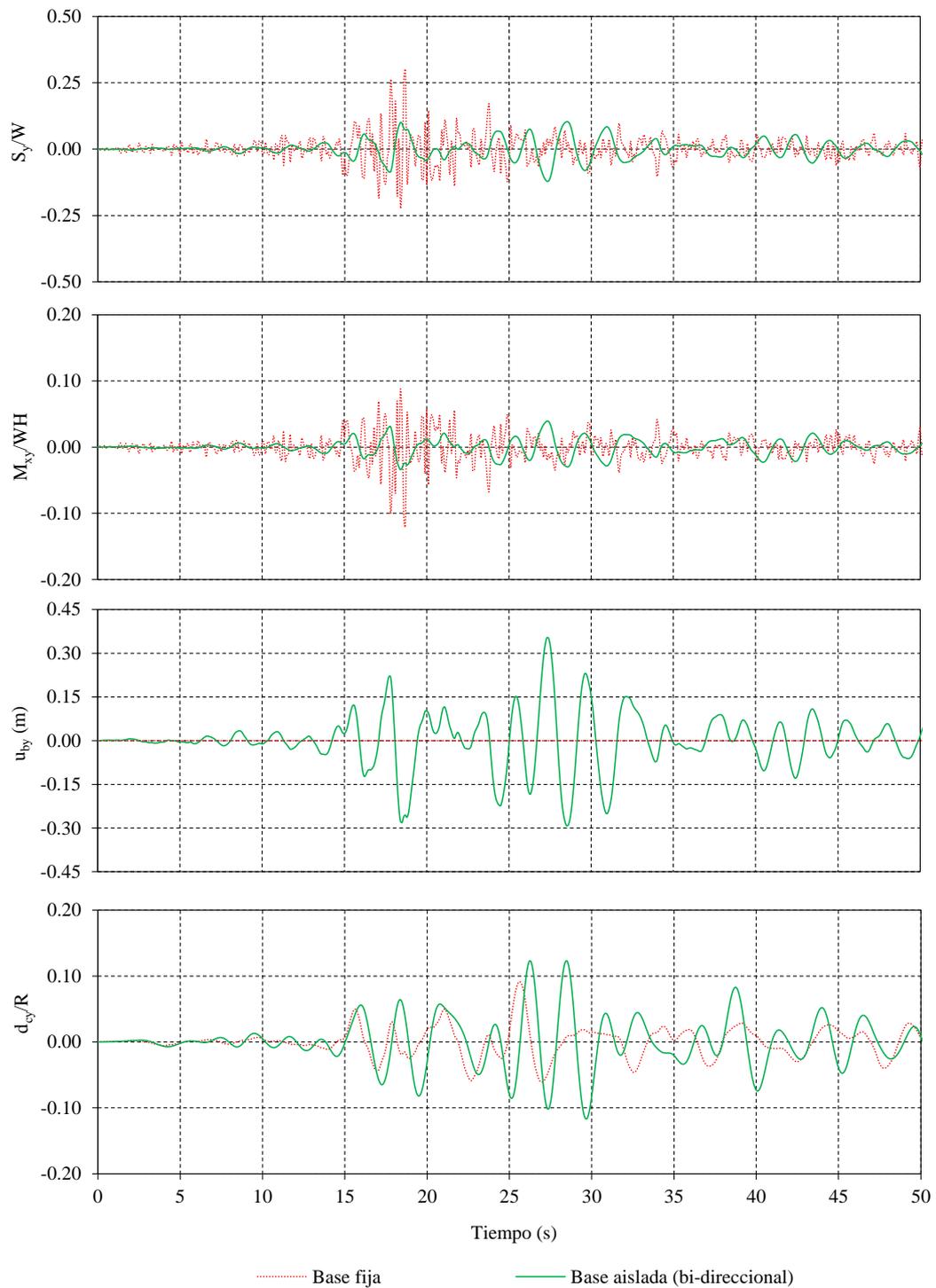


Figura 4.9 Variación en el tiempo de la respuesta del sistema de base fija y del sistema de base aislada ($H/R = 1.0$, $e/R = 0.02$; $T_b = 4$ s, y $\mu_b = 0.01 - 0.02$) en la dirección y debido al terremoto de Pisco 2007 (registros escalados).

La Figura 4.10 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base fija, con $e/R = 0.02$; y a los

sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica bi-direccional, de donde se pueden desprender las siguientes observaciones:

- a) La variación de la fuerza cortante basal, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -70% a 1% para $H/R = 0.5$; de -82% a -46% para $H/R = 1.0$; de -90% a -70% para $H/R = 2.0$.
- b) La variación del momento volcante de las paredes, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -68% a 0% para $H/R = 0.5$; de -82% a -49% para $H/R = 1.0$; de -91% a -72% para $H/R = 2.0$.
- c) La variación del desplazamiento vertical del oleaje, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de 5% a 36% para $H/R = 0.5$; de 14% a 70% para $H/R = 1.0$; de 32% a 72% para $H/R = 2.0$.

La Figura 4.11 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base fija, con $e/R = 0.04$; y a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.04$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica bi-direccional, de donde se pueden desprender las siguientes observaciones:

- a) La variación de la fuerza cortante basal, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -73% a -14% para $H/R = 0.5$; de -81% a -40% para $H/R = 1.0$; de -89% a -65% para $H/R = 2.0$.
- b) La variación del momento volcante de las paredes, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -72% a -13% para $H/R = 0.5$; de -81% a -43% para $H/R = 1.0$; de -90% a -68% para $H/R = 2.0$.
- c) La variación del desplazamiento vertical del oleaje, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de 9% a 56% para $H/R = 0.5$; de 17% a 79% para $H/R = 1.0$; de 33% a 80% para $H/R = 2.0$.

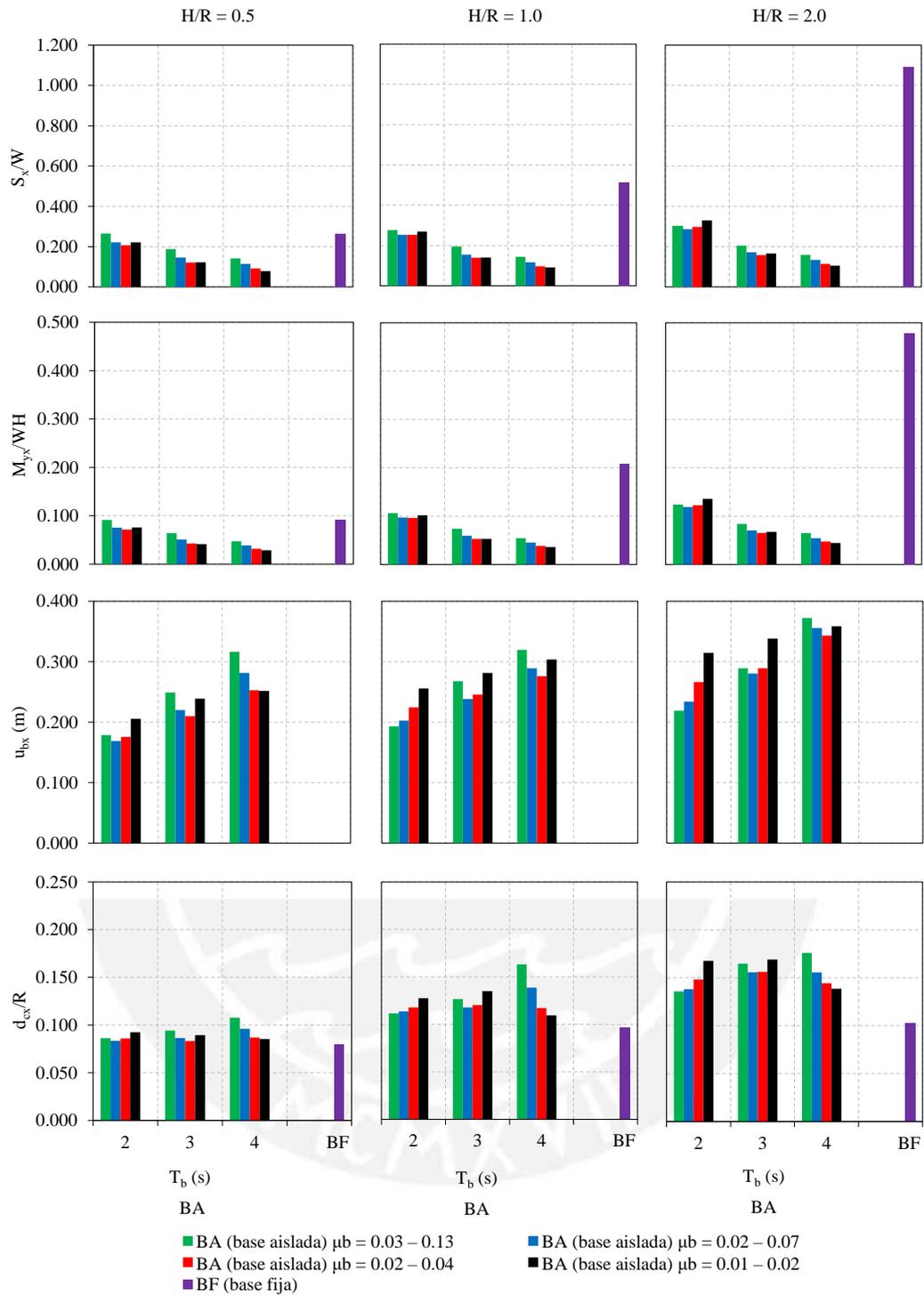


Figura 4.10 Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$).

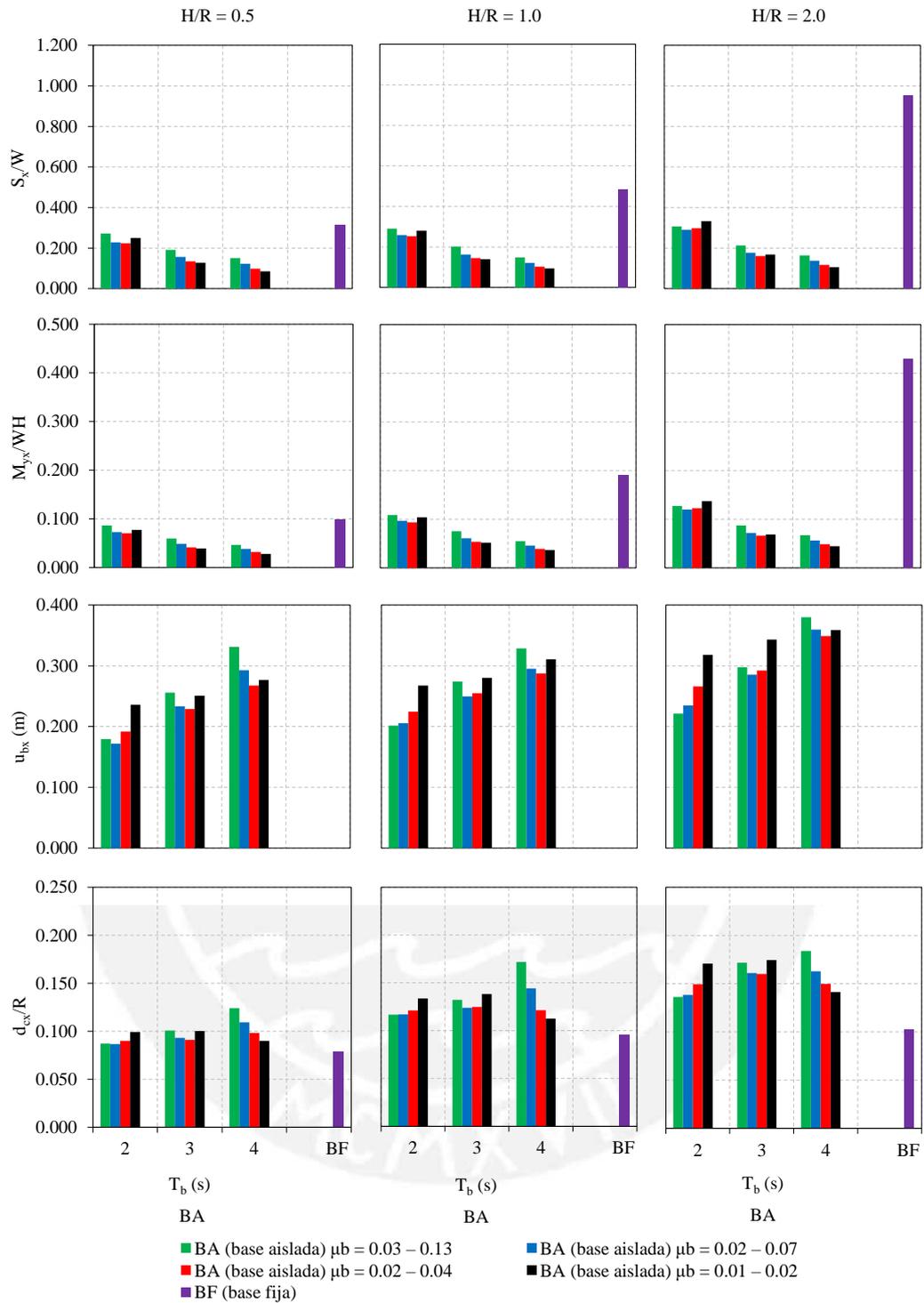


Figura 4.11 Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$).

La Figura 4.12 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base fija, con $e/R = 0.02$; y a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica bi-direccional, de donde se pueden desprender las siguientes observaciones:

- La variación de la fuerza cortante basal, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -67% a -2% para $H/R = 0.5$; de -83% a -45% para $H/R = 1.0$; de -91% a -71% para $H/R = 2.0$.
- La variación del momento volcante de las paredes, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -66% a -5% para $H/R = 0.5$; de -83% a -49% para $H/R = 1.0$; de -91% a -73% para $H/R = 2.0$.
- La variación del desplazamiento vertical del oleaje, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de 7% a 38% para $H/R = 0.5$; de 18% a 77% para $H/R = 1.0$; de 36% a 95% para $H/R = 2.0$.

La Figura 4.13 muestra las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base fija, con $e/R = 0.04$; y a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.04$, T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de 0.01 – 0.02 a 0.03 – 0.12, bajo excitación sísmica bi-direccional, de donde se pueden desprender las siguientes observaciones:

- La variación de la fuerza cortante basal, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -71% a -8% para $H/R = 0.5$; de -80% a -36% para $H/R = 1.0$; de -90% a -69% para $H/R = 2.0$.
- La variación del momento volcante de las paredes, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de -70% a -10% para $H/R = 0.5$; de -80% a -40% para $H/R = 1.0$; de -90% a -71% para $H/R = 2.0$.
- La variación del desplazamiento vertical del oleaje, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de 14% a 53% para $H/R = 0.5$; de 21% a 95% para $H/R = 1.0$; de 38% a 107% para $H/R = 2.0$.

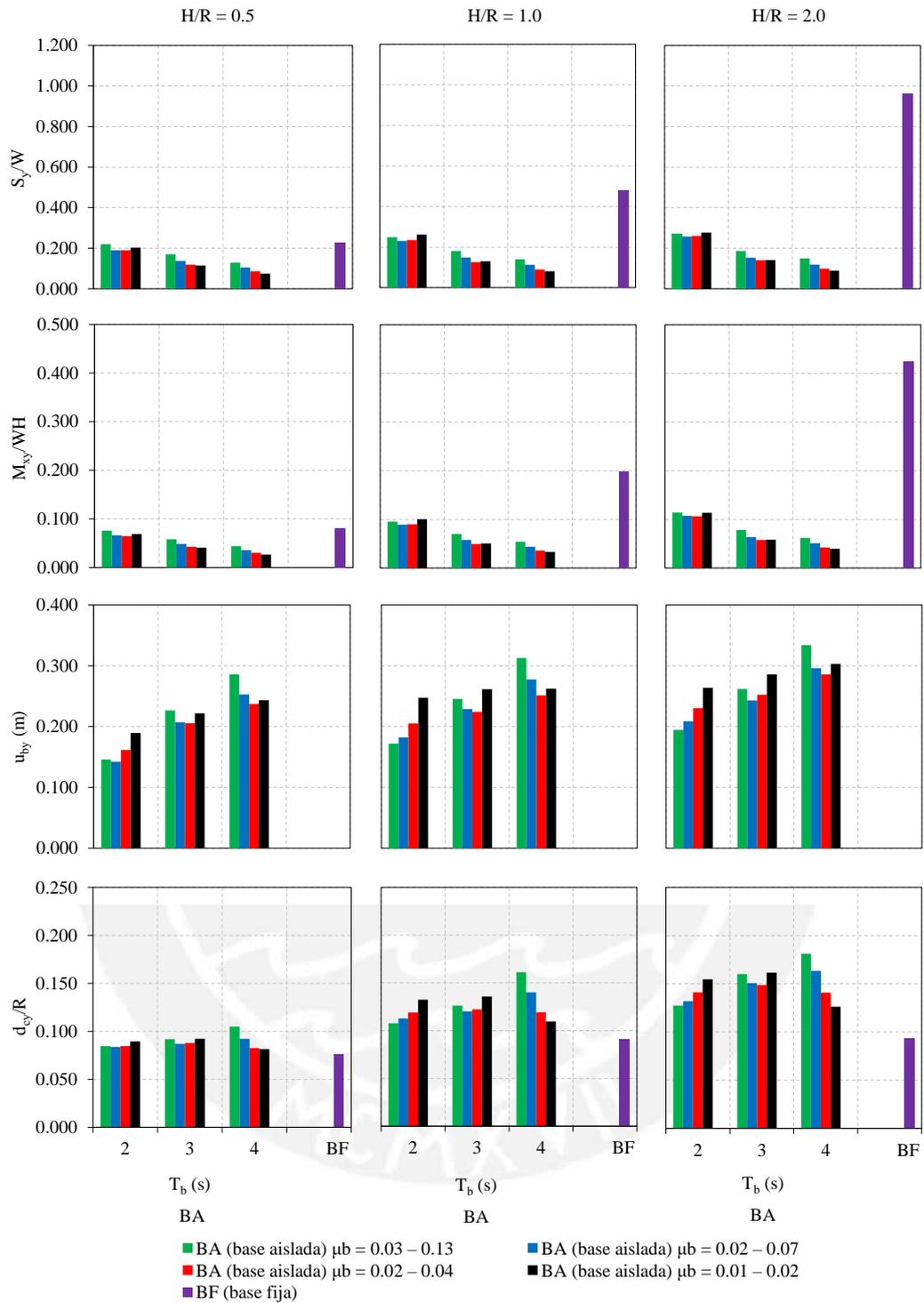


Figura 4.12 Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.02$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$).

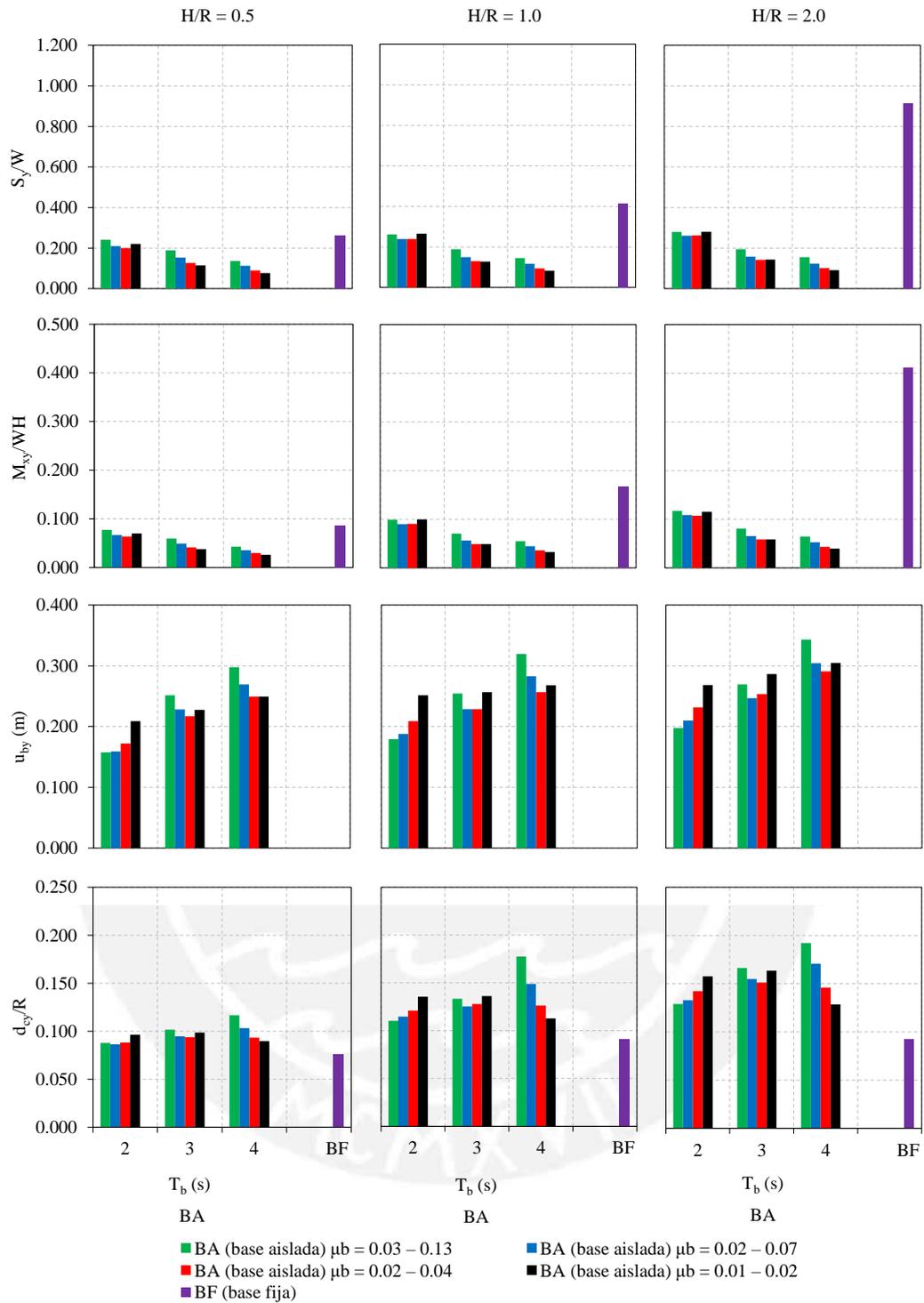


Figura 4.13 Efecto de los parámetros T_b , y μ_b sobre las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y de los sistemas de base fija y de los sistemas de base aislada ($e/R = 0.04$; $H/R = 0.5$, $H/R = 1.0$, y $H/R = 2.0$).

4.2.1 Efecto de la Razón Altura del Agua-Radio Interior del Tanque H/R

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro H/R es del orden de:

- a) 22% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 36% en el momento volcante de las paredes normalizado.
- c) 52% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 28% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro H/R es del orden de:

- a) 29% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 45% en el momento volcante de las paredes normalizado.
- c) 54% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 31% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

4.2.2 Efecto de la Razón Espesor de la Pared del Tanque-Radio Interior del Tanque e/R

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro e/R es del orden de:

- a) 13% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 7% en el momento volcante de las paredes normalizado.

- c) 15% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 15% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro e/R es del orden de:

- a) 12% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 7% en el momento volcante de las paredes normalizado.
- c) 13% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 12% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

4.2.3 Efecto del Período Objetivo de Vibración del Sistema de Aislación T_b

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro T_b es del orden de:

- a) 50% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 50% en el momento volcante de las paredes normalizado.
- c) 30% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 43% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro T_b es del orden de:

- a) 52% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 51% en el momento volcante de las paredes normalizado.

- c) 33% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 60% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

4.2.4 Efecto del Coeficiente de Fricción del Sistema de Aislación μ_b

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección x correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro μ_b es del orden de:

- a) 28% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 26% en el momento volcante de las paredes normalizado.
- c) 19% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 19% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

Las Figuras 4.12 y 4.13 muestran las respuestas sísmicas de diseño normalizadas en la dirección y correspondientes a los sistemas de base aislada, con $e/R = 0.02$ a 0.04 , $H/R = 0.5$ a 2.0 , T_b de 2 s a 4 s, y μ_b de $0.01 - 0.02$ a $0.03 - 0.12$, bajo excitación sísmica bi-direccional, donde el efecto de la variación del parámetro μ_b es del orden de:

- a) 26% en la fuerza cortante basal normalizada.
- b) 25% en el momento volcante de las paredes normalizado.
- c) 19% en el desplazamiento vertical del oleaje normalizado.
- d) 18% en el desplazamiento lateral de la base del tanque.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones se desprenden de la investigación son válidas para el conjunto de casos definidos paramétricamente de los sistemas de base aislada con FPS, ubicados en la zona sísmica 4 y apoyados en suelo tipo S_2 :

- a) Despreciar el efecto del movimiento bi-direccional tiene un efecto significativo del orden de 14% para $e/R = 0.02$ y 10% para $e/R = 0.04$ sobre la fuerza cortante basal.
- b) Despreciar el efecto del movimiento bi-direccional tiene un efecto significativo del orden de 21% para $e/R = 0.02$ y 20% para $e/R = 0.04$ sobre el momento volcante de las paredes.
- c) Despreciar el efecto del movimiento bi-direccional tiene un efecto poco significativo del orden de 13% para $e/R = 0.02$ y 0.04 sobre el desplazamiento lateral de la base.
- d) Despreciar el efecto del movimiento bi-direccional tiene un efecto muy significativo del orden de 9% para $e/R = 0.02$ y 0.04 sobre el desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*).
- e) La reducción de la fuerza cortante basal, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de hasta 73% para $H/R = 0.5$; 83% para $H/R = 1.0$; y 91% para $H/R = 2.0$.
- f) La reducción del momento volcante de las paredes, con respecto a los sistemas de base fija es del orden de hasta 72% para $H/R = 0.5$; 83% para $H/R = 1.0$; y 91% para $H/R = 2.0$.
- g) La variación del desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*), con respecto a los sistemas de base fija es del orden de 5% a 56% para $H/R = 0.5$; de 14% a 95% para $H/R = 1.0$; de 32% a 107% para $H/R = 2.0$. Esto puede ser considerado como un inconveniente para los sistemas de base aislada en comparación con los sistemas de base fija, donde se pueden presentar mayores amplificaciones del desplazamiento vertical del oleaje.

- h) El parámetro H/R tiene un mayor efecto que el parámetro e/R en la reducción de la fuerza cortante basal y del momento volcante de las paredes con respecto a los sistemas de base fija.
- i) El parámetro T_b tiene un mayor efecto que el parámetro μ_b en la reducción de la fuerza cortante basal y del momento volcante de las paredes con respecto a los sistemas de base fija.
- j) Existe un óptimo valor del coeficiente de fricción, μ_b , del sistema de aislación en el que la fuerza cortante basal y el momento volcante de las paredes es mínima. Para los casos utilizados en este estudio, se determina que este valor óptimo es $\mu_b = 0.01 - 0.02$ y $0.02 - 0.04$.

5.2 RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones de la investigación son válidas para el conjunto de casos definidos paramétricamente de los sistemas de base aislada con FPS, ubicados en la zona sísmica 4 y apoyados en suelo tipo S_2 :

- a) Debido al aumento en el desplazamiento vertical del oleaje (*sloshing*) cuando el tanque está sísmicamente aislado, se recomienda que la altura libre sobre la superficie del agua debería aumentarse para superar tal desventaja. Entre 8% y 13% de R para $H/R = 0.5$; 11% y 19% de R para $H/R = 1.0$, 13% y 21% de R para $H/R = 2.0$, dependiendo del período objetivo de vibración del sistema de aislación y el coeficiente de fricción del sistema de aislación.
- b) Debido al aumento del desplazamiento de la base cuando el tanque está sísmicamente aislado, se recomienda que la distancia de separación entre otras estructuras adyacentes debería aumentarse. Entre 14 cm y 35 cm para $H/R = 0.5$; 17 cm y 34 cm para $H/R = 1.0$, 19 cm y 40 cm para $H/R = 2.0$, dependiendo del período objetivo de vibración del sistema de aislación y el coeficiente de fricción del sistema de aislación.
- c) Se recomienda verificar la estabilidad del sistema de aislación mediante un análisis no lineal tiempo-historia utilizando más de 7 pares registros sísmicos, correspondientes a las dos componentes horizontales, seleccionadas y escaladas de eventos individuales, los cuales deberán

ser compatibles con un espectro de diseño objetivo para el sismo máximo considerado (MCE, *maximum considered earthquake*).

- d) Se recomienda estudiar el efecto de la interacción suelo-estructura sobre el comportamiento no-lineal de tanques de CA para almacenamiento de agua con sistema de aislación en la base. Este efecto no se consideró en este estudio para el análisis dinámico.
- e) Se recomienda estudiar la respuesta sísmica de tanques de CA para almacenamiento de agua con sistema de aislación del tipo péndulo triple (TPB, *Triple Pendulum Bearings*).



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Concrete Institute (2006): *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary*. ACI 350.3-06, Farmington Hills, MI, USA.
2. American Society of Civil Engineers (2010): *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. ASCE/SEI 7-10, Reston, VA, USA.
3. Billings I, Charman N (2011): Christchurch City Council Lifelines-Performance of Concrete Potable Water Reservoirs in the February 2011 Christchurch Earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **44**(4), 418-424.
4. Bouc R (1971): Modèle Mathématique d'Hystérésis. *Journal International d'Acoustique*, **24**(1), 16-25.
5. Buckle IG, Mayes RL (1990): Seismic Isolation: History, Application and Performance-a World Overview. *Earthquake Spectra*, **6**(2), 161-202.
6. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (2014): *Estudio de Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad en la Ciudad de Lima*. CISMID, Lima, Perú.
7. Chalhoub MS, Kelly JM (1988): Theoretical and Experimental Studies of Cylindrical Water Tanks in Base Isolated Structures. Technical Report No. UCB/EERC 1988/10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA.
8. Chalhoub MS, Kelly JM (1990): Shake Table Test of Cylindrical Water Tanks in Base-Isolated Structures. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, **116**(7), 1451-1472.
9. Christopoulos C, Filiatrault A, Bertero VV (2006): *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press, Pavia, Italy.

10. Christovasilis IP, Whittaker AS (2008): Seismic Analysis of Conventional and Isolated LNG Tanks Using Mechanical Analogs. *Earthquake Spectra*, **24**(3) 599-616.
11. Chopra AK (2012): Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
12. Clough DP (1977): Experimental Evaluation of Seismic Design Methods for Broad Cylindrical Tanks. Technical Report No. UCB/EERC 1977/10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA.
13. Computers and Structures Incorporation (2014): *SAP2000 v17*. CSI, Berkeley, CA, USA.
14. Constantinou MC, Mokha A, Reihorn AM (1990): Teflon Bearing in Base Isolation II: Modeling. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**(2), 455-474.
15. Davey R (2010): Damage to Potable Water Reservoirs in the Darfield Earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **43**(4), 429-431.
16. De Angelis M, Giannini R, Paolacci F (2010): Experimental Investigation on the Seismic Response of a Steel Liquid Storage Tank Equipped with Floating Roof by Shaking Table Tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(4), 377-396.
17. EPS (2010): *Chile LNG Storage Tank*. Earthquake Protection Systems, Inc. California, USA.
18. EPS (2014): *Friction Pendulum™ Seismic Isolation*. Earthquake Protection Systems, Inc. California, USA.
19. Epstein HI (1976): Seismic Design of Liquid Storage Tanks. *Journal of the Structural Division, ASCE*, **102**(9), 1659-1673.
20. Federal Emergency Management Agency (2000): *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. FEMA 356, Washington, DC, USA.

21. Fenz DM, Constantinou MC (2008). Spherical Sliding Isolation Bearings with Adaptive Behavior: Experimental Verification. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**(2), 185-205.
22. Graham EW, Rodriguez AM (1952): The Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics. *Journal of Applied Mechanics, ASME*, **19**(3), 381-388.
23. Hachem MM (2008): QuakeManager: A Software Framework for Ground Motion Record Management, Selection, Analysis and Modification. *14th World Conference on Earthquake Engineering WCEE*, Beijing, China.
24. Haroun MA, Housner GW (1981): Seismic Design of Liquid Storage Tanks. *Journal of Technical Councils of ASCE*, **107**(1), 191-207.
25. Haroun MA, Housner GW (1982): Dynamic Characteristics of Liquid Storage Tanks. *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, **108**(5), 783-800.
26. Haroun MA (1983): Vibration Studies and Tests of Liquid Storage Tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**(2), 179-206.
27. Hilber HM, Hughes TJR, Taylor RL (1977). Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **5**(3), 283-292.
28. Housner GW (1954): *Earthquake Pressures on Fluid Containers*. California Institute of Technology. Pasadena, CA, USA.
29. Housner GW (1957): Dynamic Pressures on Accelerated Fluid Containers. *Bulletin of Seismological Society of America*, **47**(1), 15-35.
30. Housner GW (1963): Dynamic Behavior of Water Tanks. *Bulletin of Seismological Society of America*, **53**(2), 381-387.
31. Hwang JS, Chang KC, Lee GC (1990): Quasi Static and Dynamic Characteristics of Teflon-Stainless Steel Interfaces. *Journal of Structural Engineering*, **116**(10), 2747-2762.

32. Jacobsen LS (1949): Impulsive Hydrodynamics of Fluid inside a Cylindrical Tank and of a Fluid Surrounding a Cylindrical Pier. *Bulletin of Seismological Society of America*, **39**(3), 189-204.
33. Jacobsen LS (1951): Hydrodynamic Experiments with Rigid Cylindrical Tanks Subjected to Transient Motions. *Bulletin of Seismological Society of America*, **41**(4), 313-346.
34. Kasai K, Mita A, Kitamura H, Matsuda K, Morgan TA, Taylor AW (2013): Performance of Seismic Protection Technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Earthquake Spectra*, **29**(S1) S265-S293.
35. Kelly JM (2013): *A Tested, Inexpensive Way to Protect Buildings from Earthquakes*. NOVANEXT, MA, USA.
36. Kim NS, Lee DG (1995): Pseudodynamic Test for Evaluation of Seismic Performance of Base-Isolated Liquid Storage Tanks. *Engineering Structures*, **17**(3), 198-208.
37. Kumar M, Whittaker AS, Constantinou MC (2015): Characterizing Friction in Sliding Isolation Bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **44**(9), 1409-1425.
38. Liu WK, Uras RA (1989a): Transient Failure Analysis of Liquid-Filled Shells, Part I: Theory. *Nuclear Engineering and Design*. **117**(2) 107-140.
39. Liu, WK, Uras, R.A. (1989b): Transient Failure Analysis of Liquid-Filled Shells, Part II: Applications. *Nuclear Engineering and Design*. **117**(2) 141-157.
40. Malhotra PK (1997): New Methods for Seismic Isolation of Liquid-Storage Tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**(8), 839-847.
41. Manos GC, Clough RW (1985): Tank Damage during the May 1983 Coalinga Earthquake. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **13**(4), 449-466.
42. Mazzoni S, Kalsi K, Sinclair M, Hachem M (2012): Implementation of Site-Specific Seismic Hazard Analysis and Ground Motion Selection and Modification for Use in Nonlinear Response History Analysis. *Structures Congress 2012, ASCE*, Chicago, IL, USA.

43. Mendo AR (2015): *Bases Para la Implementación de la Norma Peruana de Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. Pontificia Universidad Católica del Perú PUCP, Lima, Perú.
44. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2016): *Diseño Sismorresistente*. MVCS NTE E.030, Lima, Perú.
45. Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM (1990): Teflon Bearings in Base Isolation I: Testing. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**(2), 438-454.
46. Mokha AS, Constantinou MC, Reinhorn AM (1993): Verification of Friction Model of Teflon Bearings under Triaxial Load. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **119**(1), 240-261.
47. Moslemi M (2011): *Seismic Response of Ground Cylindrical and Elevated Conical Reinforced Concrete Tanks*. Ryerson University, Toronto, Canada.
48. Nagarajaiah S, Reinhorn AM, Constantinou MC (1991): Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **117** (7), 2035-2054.
49. Naeim F, Kelly JM (1999): *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
50. Newmark NM, Rosenblueth E (1971): *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
51. Newmark NM (1959): A Method of Computation for Structural Dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, **85**(3) 67-94.
52. OBAYASHI (2010): *Base Isolation Technology*. OBAYASHI Corporation, Tokyo, Japan.
53. Park YJ, Wen YK, Ang AH-S (1986): Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-directional Ground Motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**(4), 543–557.

54. Priestley MJN, Wood JH, Davidson BJ (1986): Seismic Design of Storage Tanks. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **19**(4), 272-284.
55. Rosenbrock HH (1963): Some General Implicit Processes for the Numerical Solution of Differential Equations. *The Computer Journal*, **5**(4), 329-330.
56. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado (2014). *Anuario Estadístico 2014*. SEDAPAL, Lima, Perú.
57. Uras RA, Liu WK (1990): Dynamic Buckling of Liquid-Filled Shells under Horizontal Excitation. *Journal of Sound and Vibration*, **141**(3), 389-408.
58. Veletsos AS (1984): Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks. Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems. *Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering*, ASCE, New York, NY, USA. 255-370, 443-461.
59. Veletsos AS, Shivakumar P (1993): Sloshing Response of Layered Liquids in Rigid Tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **22**(9), 801-821.
60. Wang YP, Teng MC, Chung KW (2001): Seismic Isolation of Rigid Cylindrical Tanks Using Friction Pendulum Bearings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(7), 1083-1099.
61. Wen YK (1976): Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, **102**(2), 249-263.
62. Wen YK (1980): Equivalent Linearization for Hysteretic Systems under Random Excitation. *Journal of Applied Mechanics*, ASME, **47**(1), 150-154.
63. Werner PW, Sundquist KJ (1949): On Hydrodynamic Earthquake Effects. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **30**(5), 636-657.
64. Wilson EL (2002): *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering*. Computer and Structures Incorporation, Berkeley, CA, USA.

65. Zareian F, Aguirre C, Beltrán JF, Cruz E, Herrera R, Leon R, Millan A, and Verdugo A (2012): Reconnaissance report of Chilean industrial facilities affected by the 2010 Chile offshore Bío-Bío earthquake. *Earthquake Spectra*, **28**(S1), S513-S532.
66. Zayas V, Low SS, Mahin SA (1987): The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report. Technical Report No. UCB/EERC 1987/01, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, USA.
67. Zayas V (2013): Seismic Isolation Design for Continued Functionality. *13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures WCSI*, Sendai, Japan.



ANEXO A

Las Figuras A.1 a A.5 muestran las 5 primeras formas de modo de la superficie del oleaje (*sloshing*) correspondientes al movimiento convectivo, el centro de la sección circular en estado de reposo es un punto nodal para cada modo, sin ninguna excepción, debido a la simetría cilíndrica del tanque.

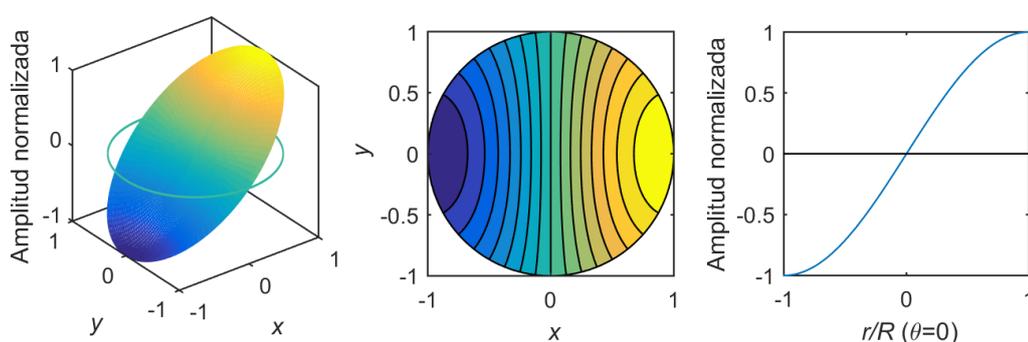


Figura A.1 Primera forma de modo de la superficie de oleaje ($\lambda_1 = 1.841$).

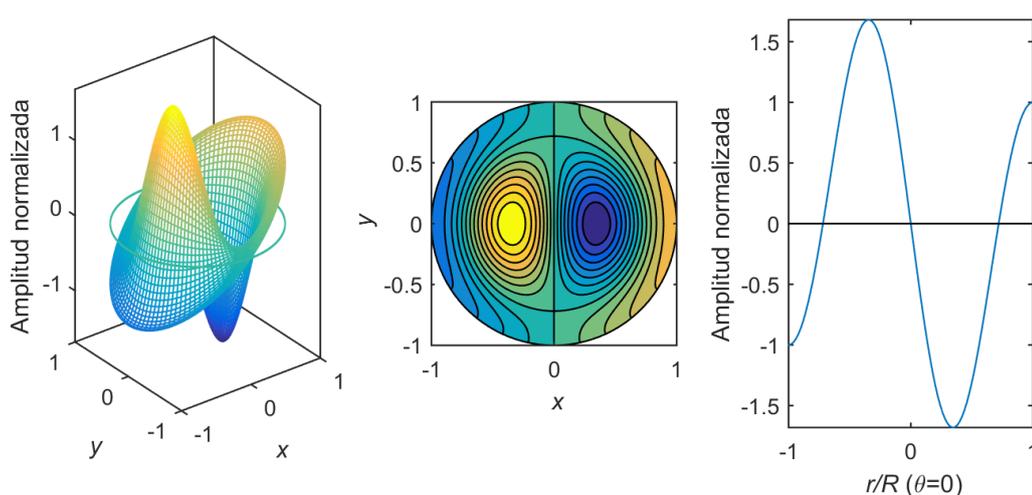


Figura A.2 Segunda forma de modo de la superficie de oleaje ($\lambda_2 = 5.332$).

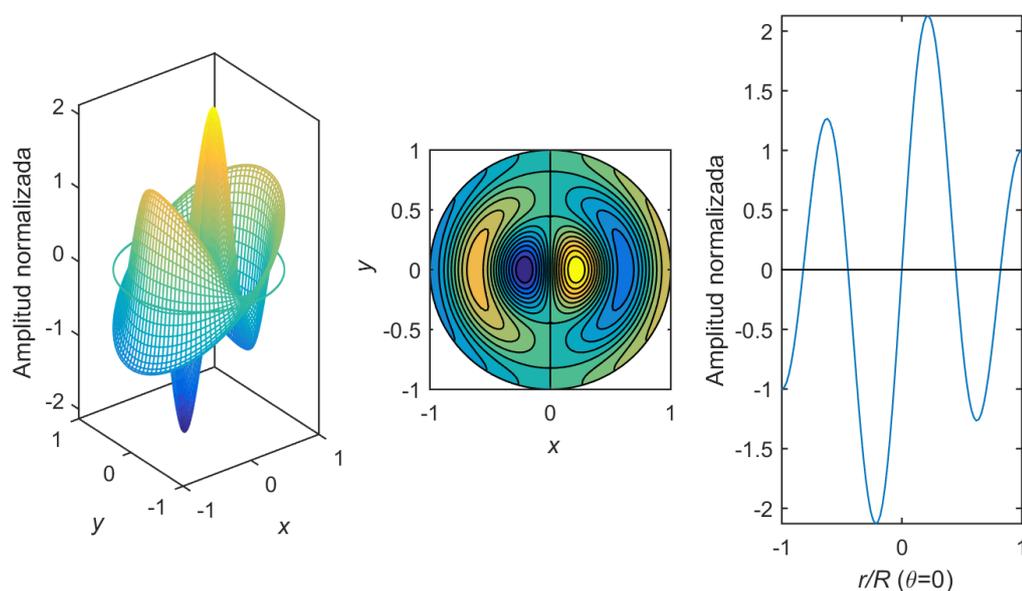


Figura A.3 Tercera forma de modo de la superficie de oleaje ($\lambda_3 = 8.537$).

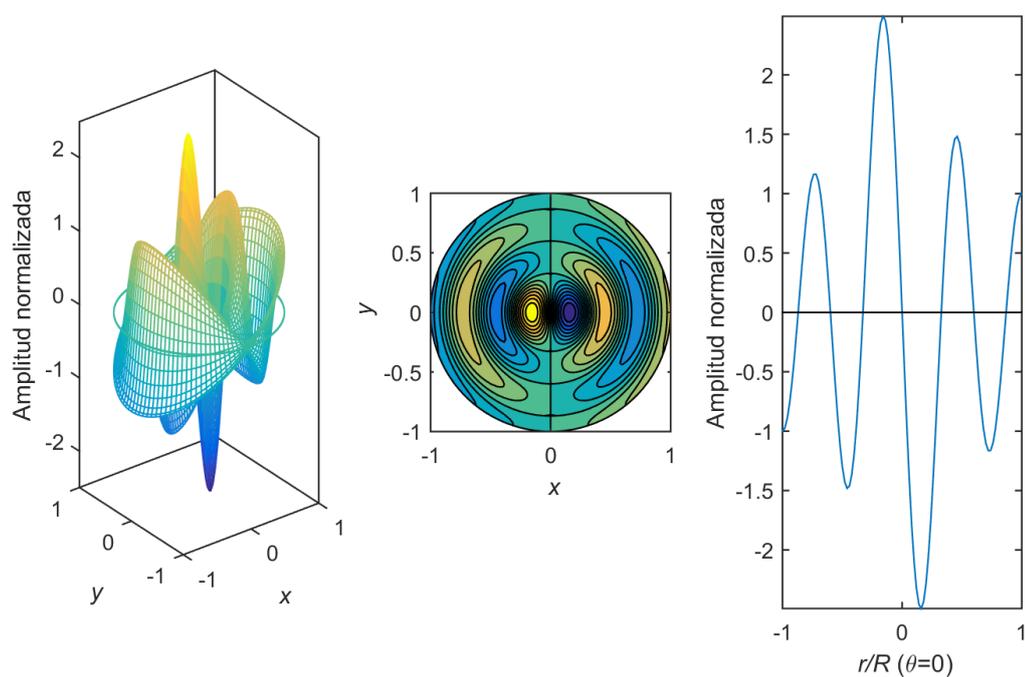


Figura A.4 Cuarta forma de modo de la superficie de oleaje ($\lambda_4 = 11.706$).

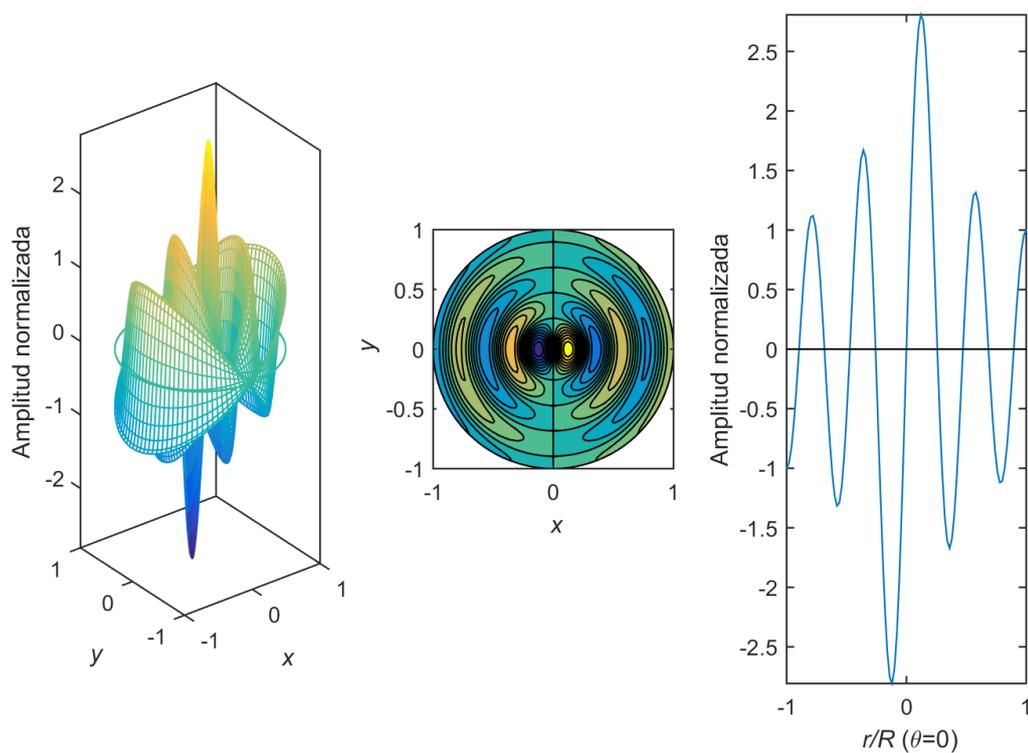


Figura A.5 Quinta forma de modo de la superficie de oleaje ($\lambda_5 = 14.864$).

ANEXO B

Las Figuras B.1 a B.42 muestran las 2 componentes ortogonales de la aceleración horizontal del suelo registradas durante los 21 eventos sísmicos severos seleccionados, con magnitudes de momento, $M_w \geq 6.5$, medidos en suelos tipo S_1 y tipo S_2 . La velocidad y el desplazamiento del suelo se calcularon mediante la integración de su aceleración.

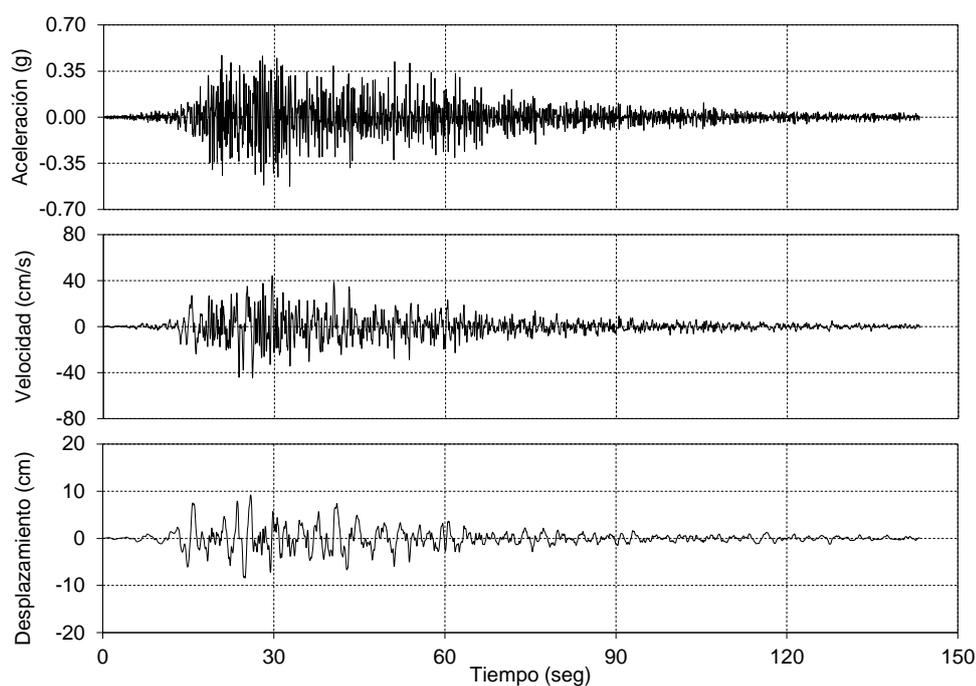


Figura B.1 Componentes L de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Constitución, durante el terremoto de Maule 2010.

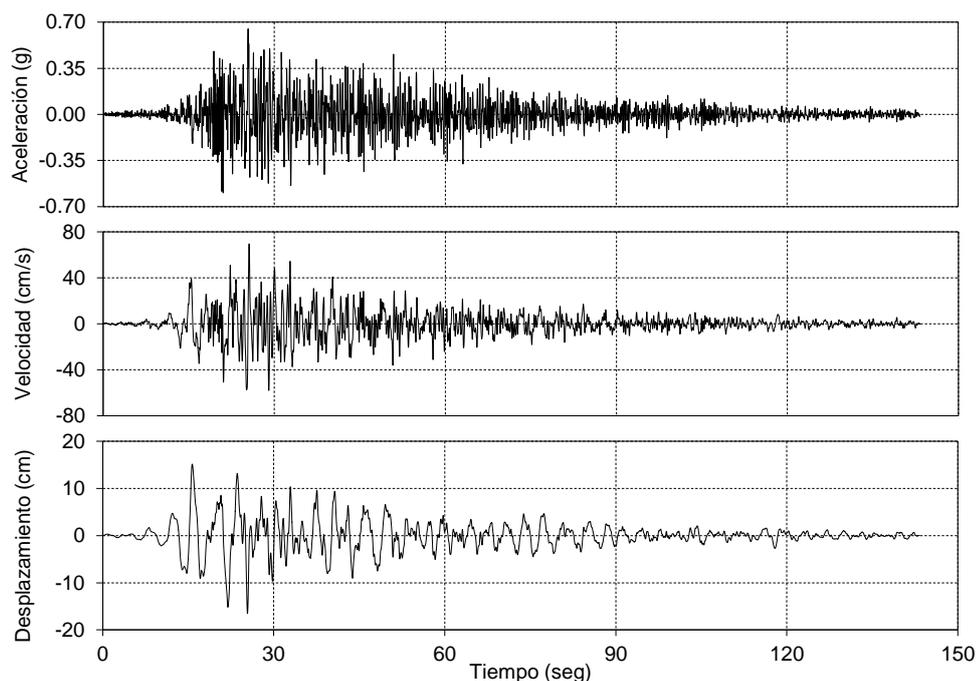


Figura B.2 Componente T de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Constitución, durante el terremoto de Maule 2010.

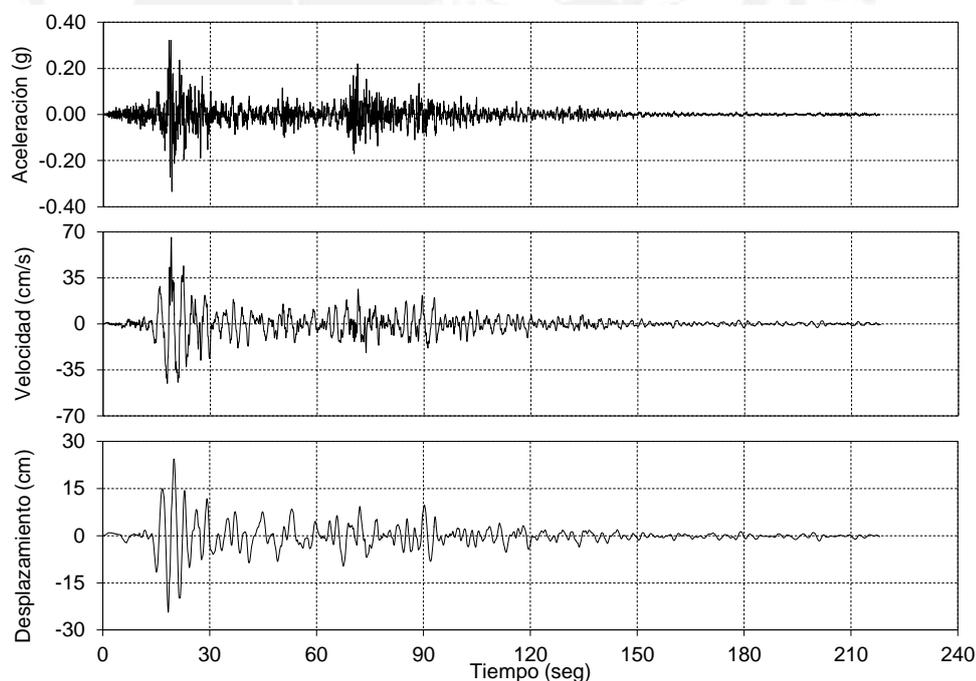


Figura B.3 Componente NS de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación UNICA, durante el terremoto de Pisco 2007.

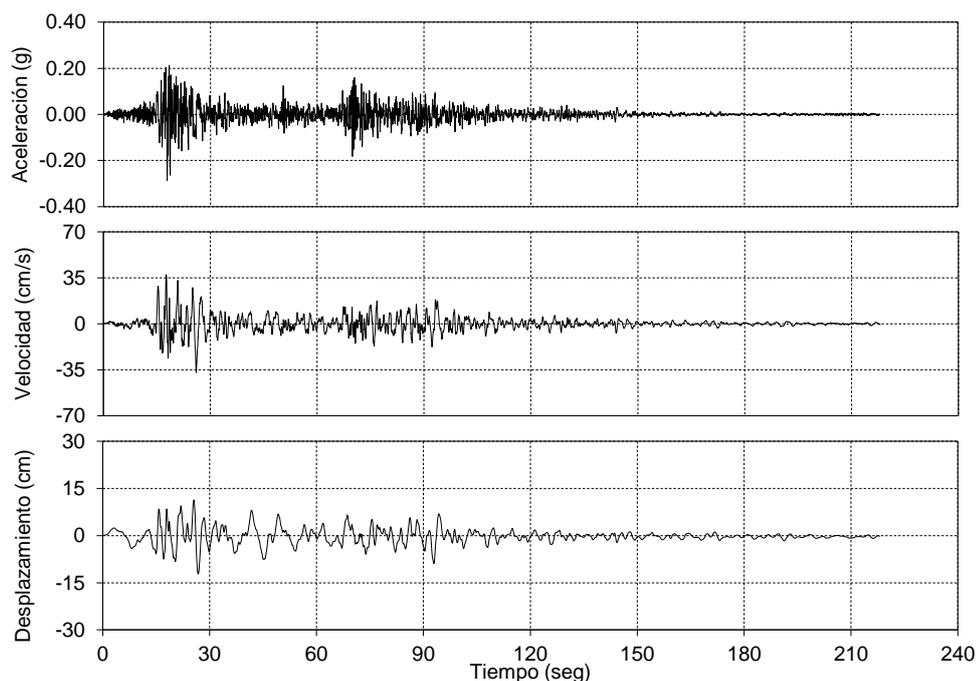


Figura B.4 Componente EW de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación UNICA, durante el terremoto de Pisco 2007.

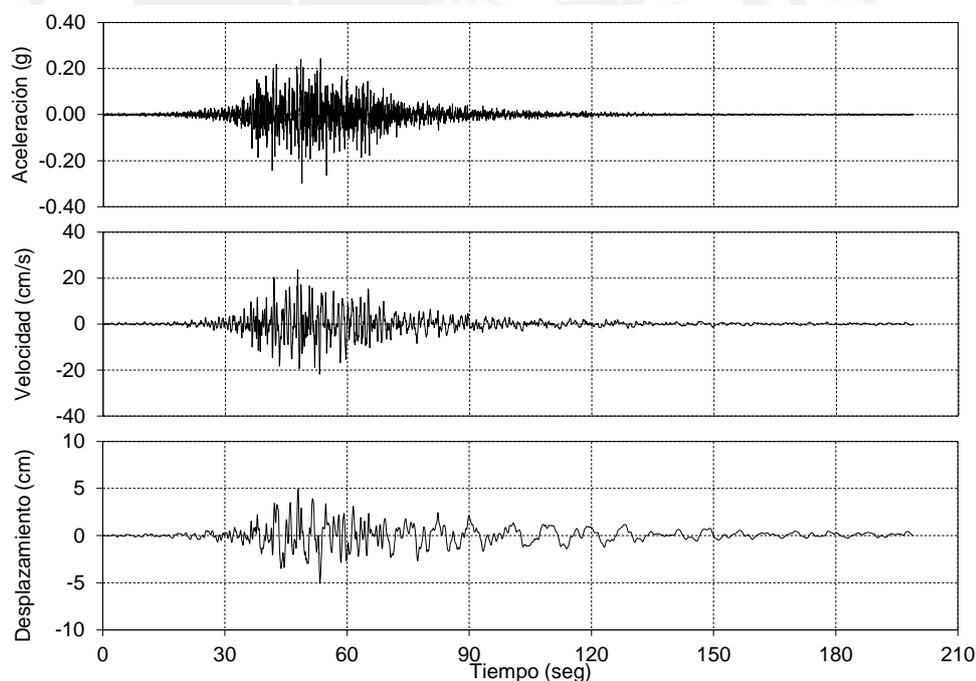


Figura B.5 Componente EW de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación César Vizcarra Vargas, durante el terremoto de Sur del Perú 2001.

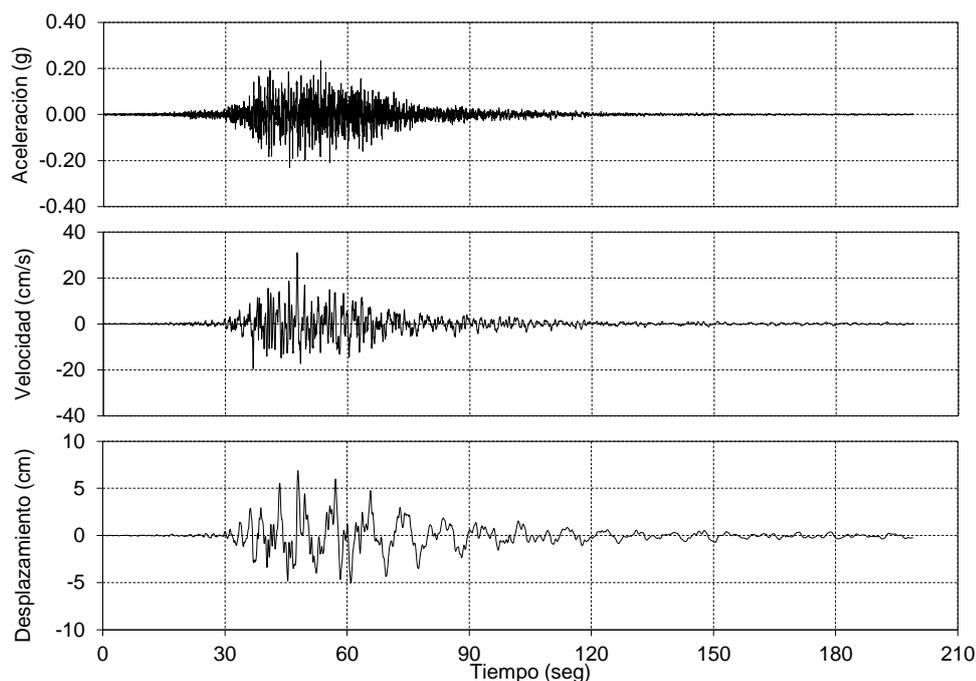


Figura B.6 Componente NS de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación César Vizcarra Vargas, durante el terremoto de Sur del Perú 2001.

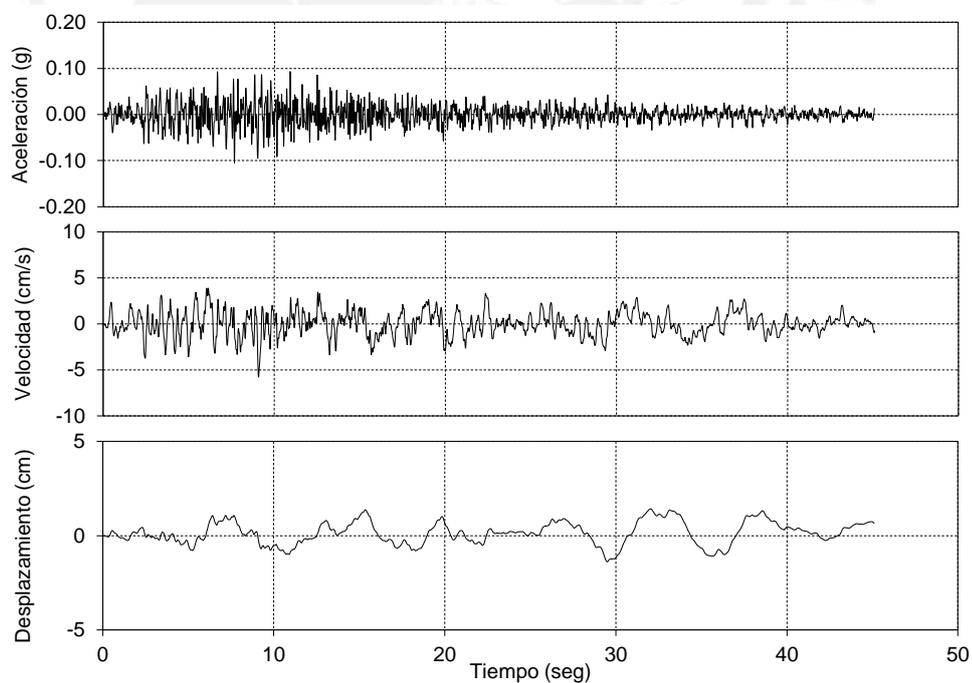


Figura B.7 Componente EW de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Parque de la Reserva, durante el terremoto de Ancash 1970.

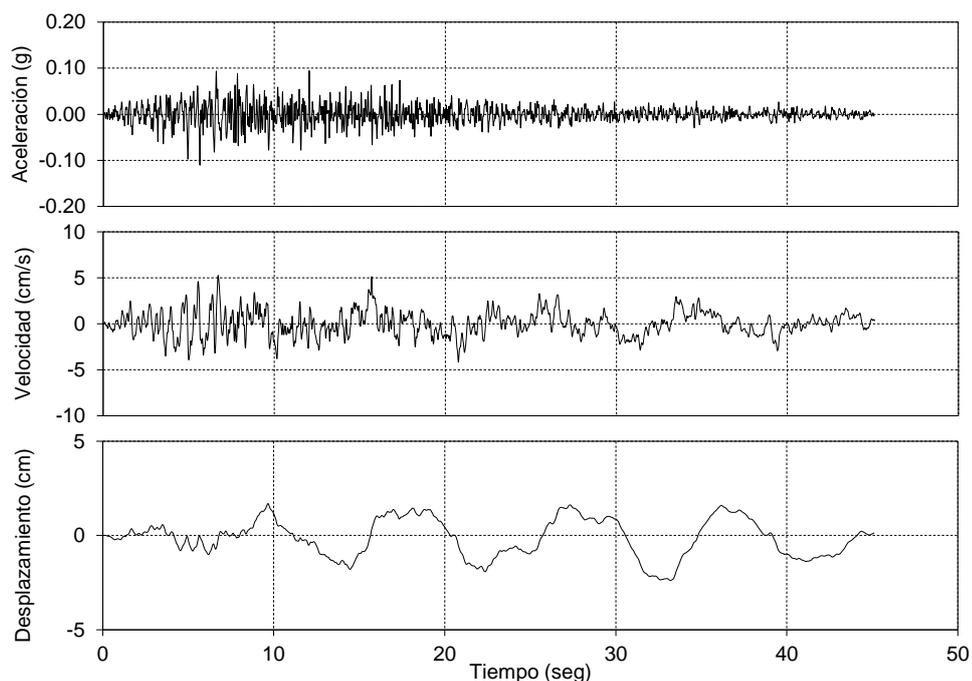


Figura B.8 Componente NS de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Parque de la Reserva, durante el terremoto de Ancash 1970.

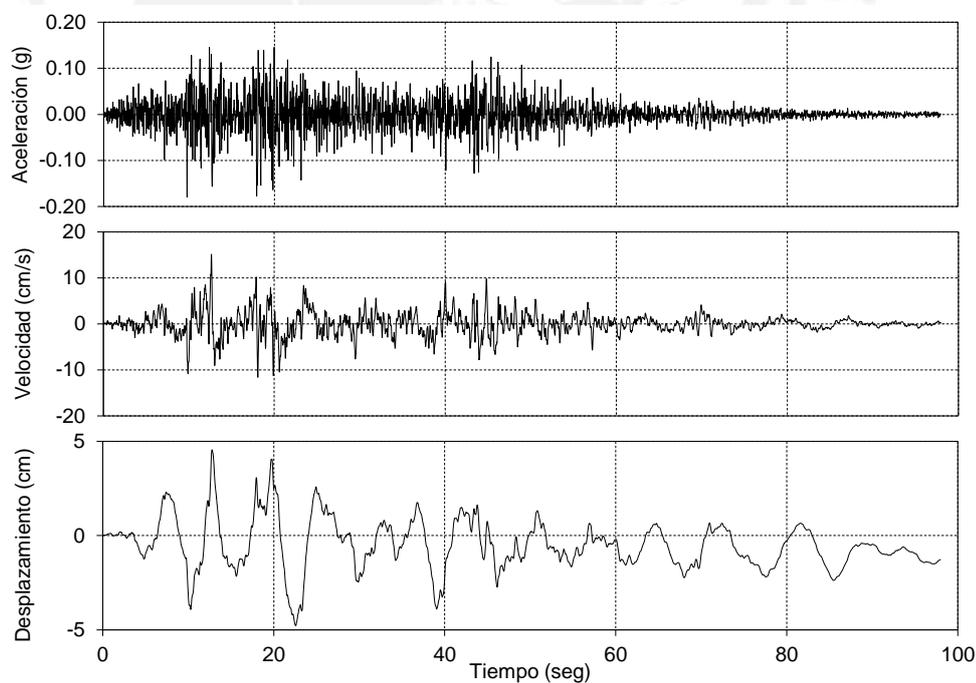


Figura B.9 Componente EW de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Parque de la Reserva, durante el terremoto de Lima 1974.

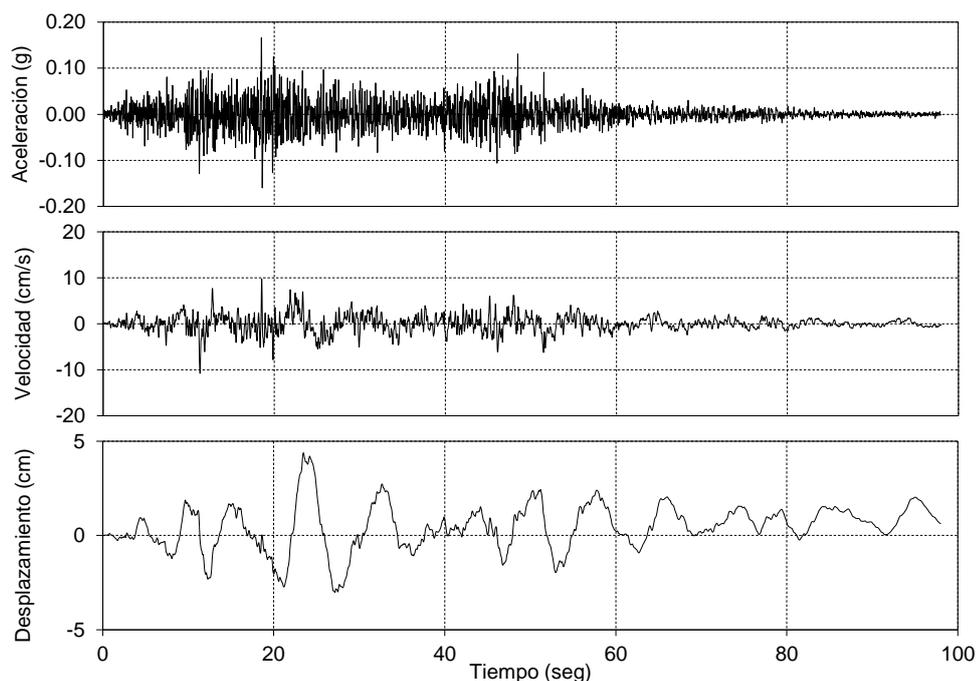


Figura B.10 Componente NS de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Parque de la Reserva, durante el terremoto de Lima 1974.

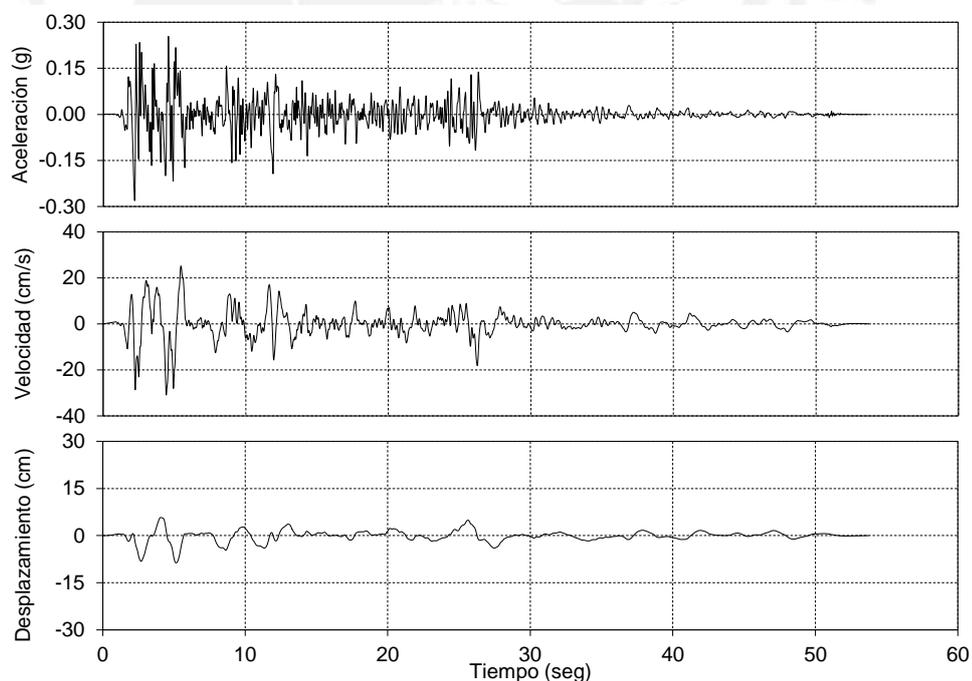


Figura B.11 Componente 180 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación El Centro Array #9, durante el terremoto de Imperial Valley-02 1940.

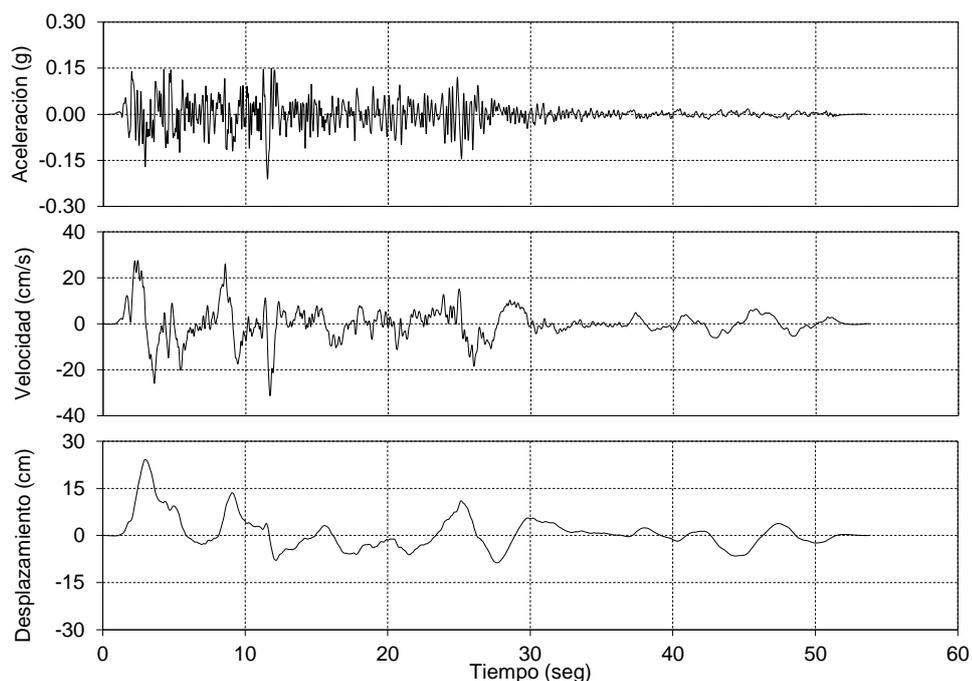


Figura B.12 Componente 270 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación El Centro Array #9, durante el terremoto de Imperial Valley-02 1940.

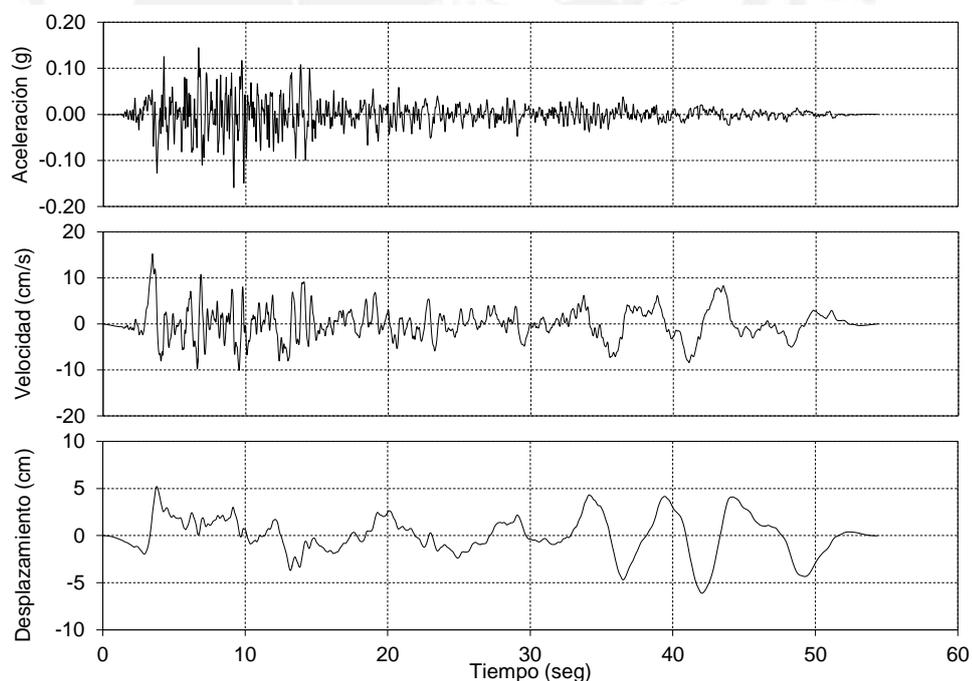


Figura B.13 Componente 21 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Taft Lincoln School, durante el terremoto de Kern Country 1952.

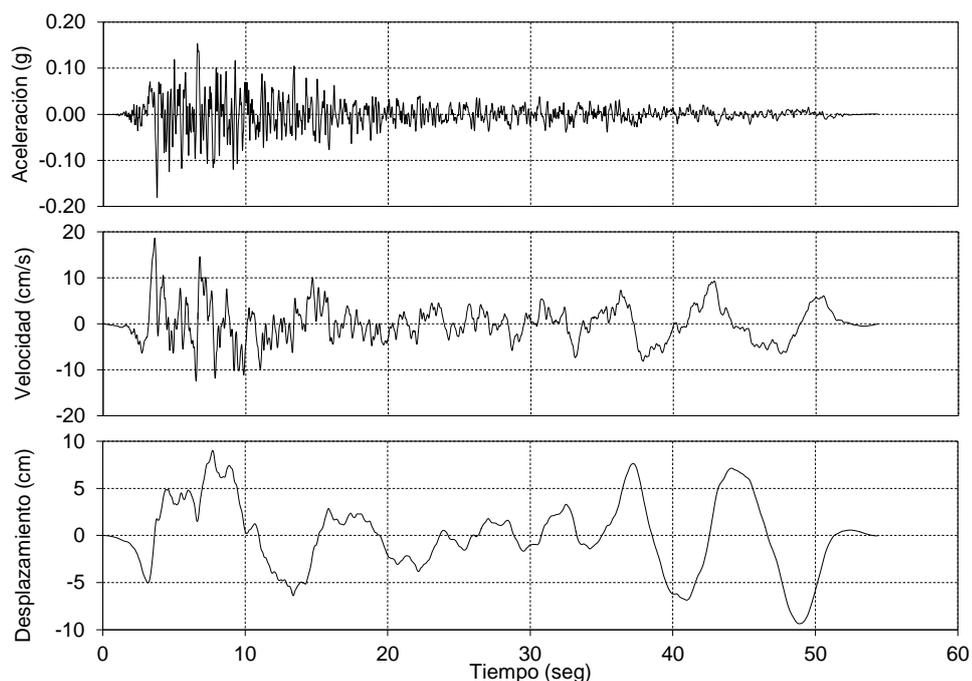


Figura B.14 Componente 111 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Taft Lincoln School, durante el terremoto de Kern Country 1952.

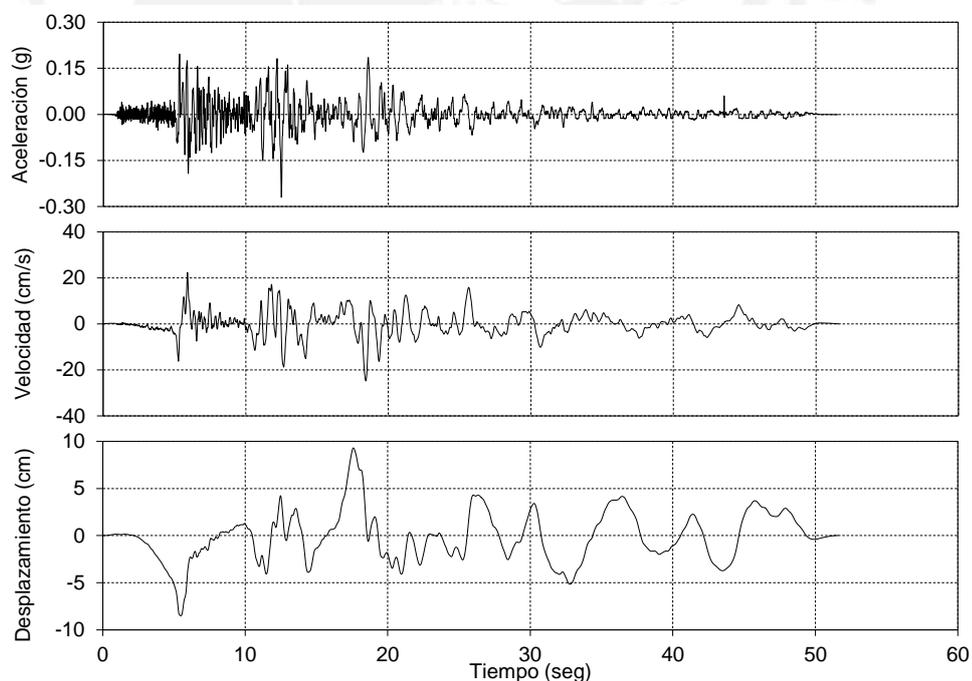


Figura B.15 Componente 12 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Chihuahua, durante el terremoto de Imperial Valley-06 1979.

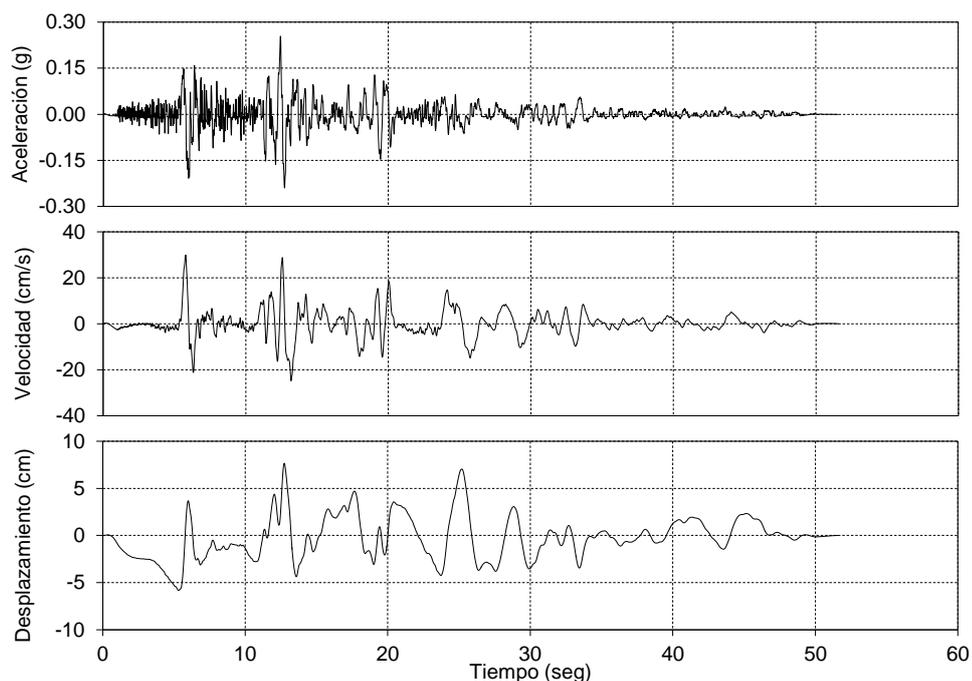


Figura B.16 Componente 282 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Chihuahua, durante el terremoto de Imperial Valley-06 1979.

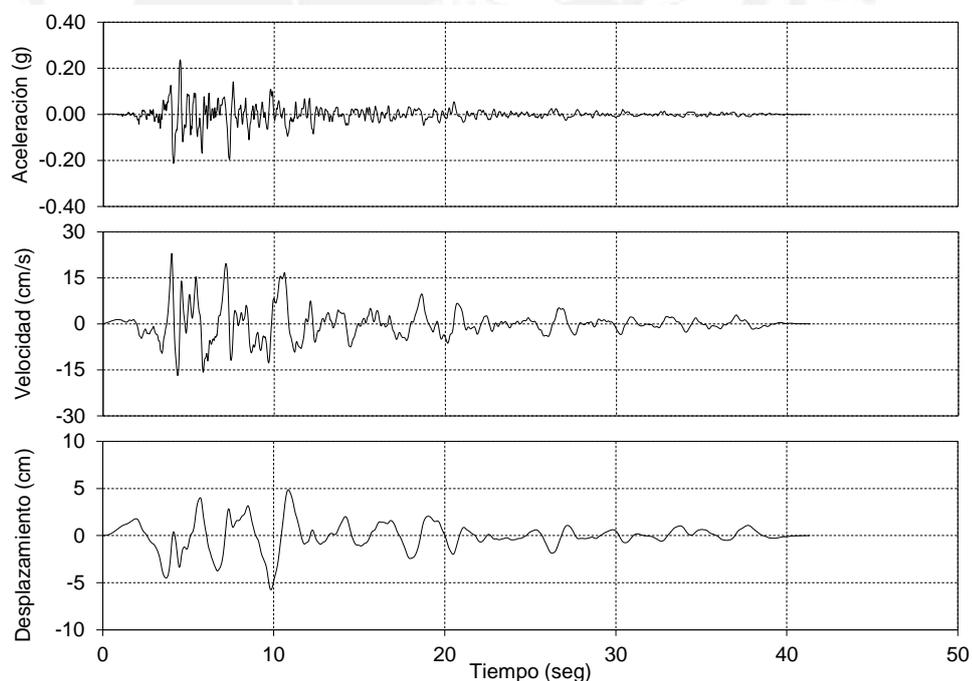


Figura B.17 Componente L de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Corinth, durante el terremoto de Corinth 1981.

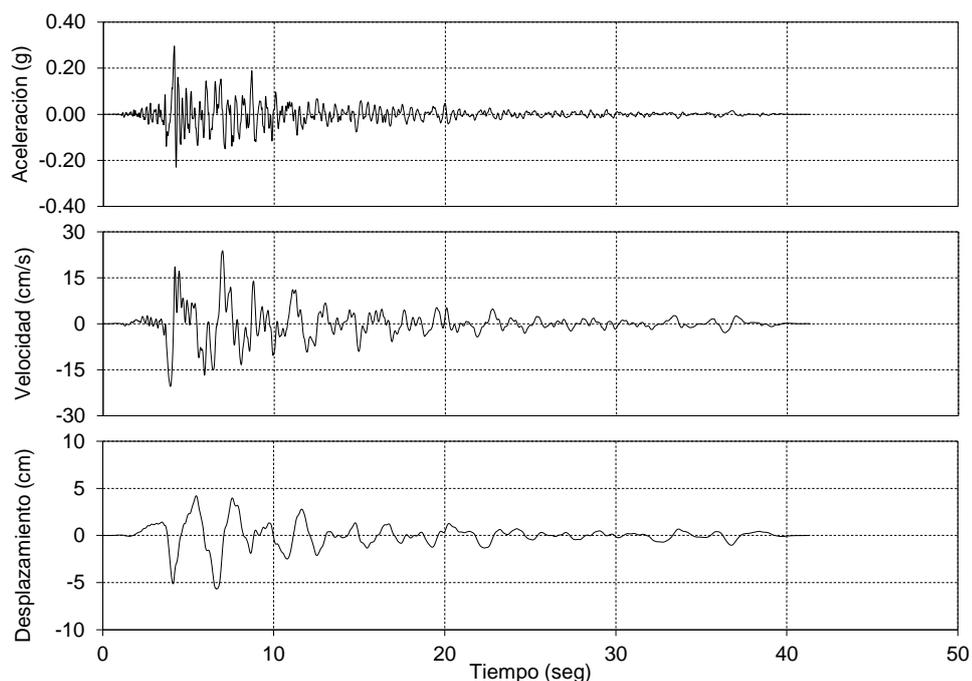


Figura B.18 Componente T de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Corinth, durante el terremoto de Corinth 1981.

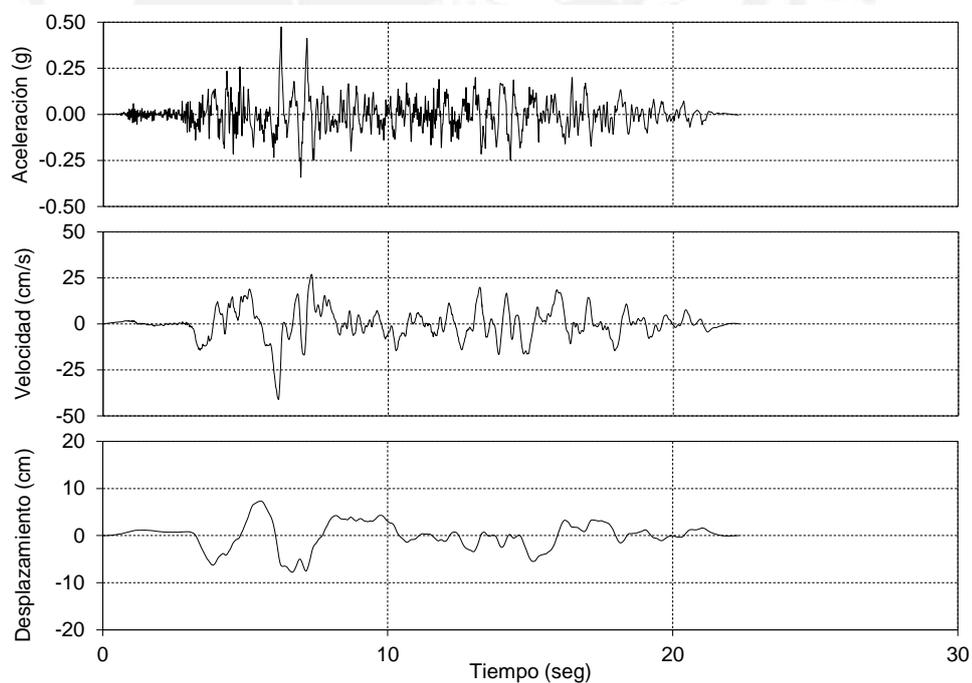


Figura B.19 Componente 270 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Poe Road (temp), durante el terremoto de Superstition Hills-02 1987.

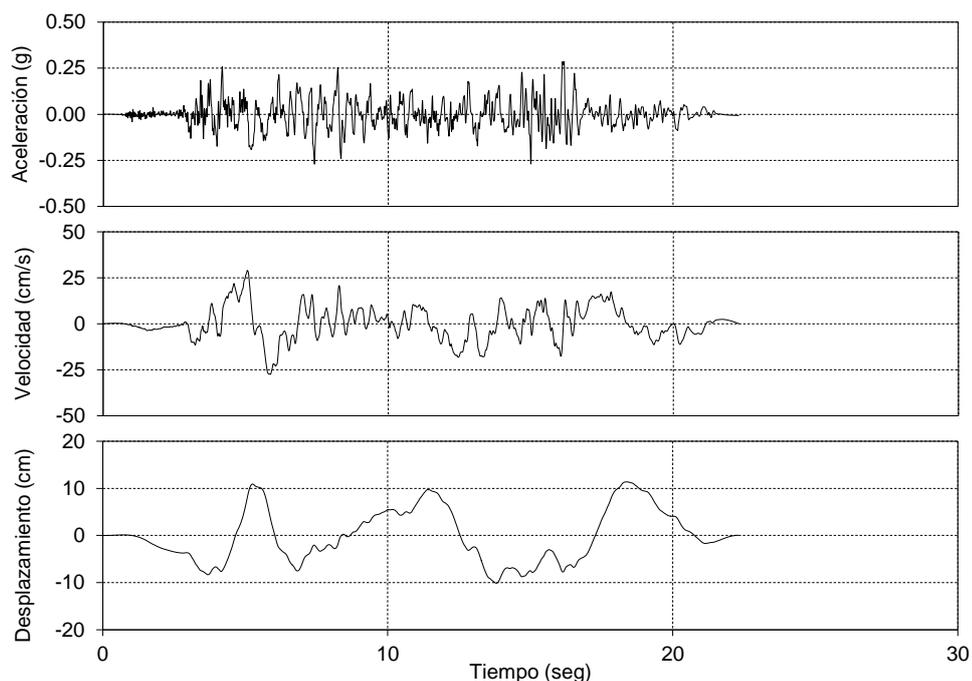


Figura B.20 Componente 360 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Poe Road (temp), durante el terremoto de Superstition Hills-02 1987.

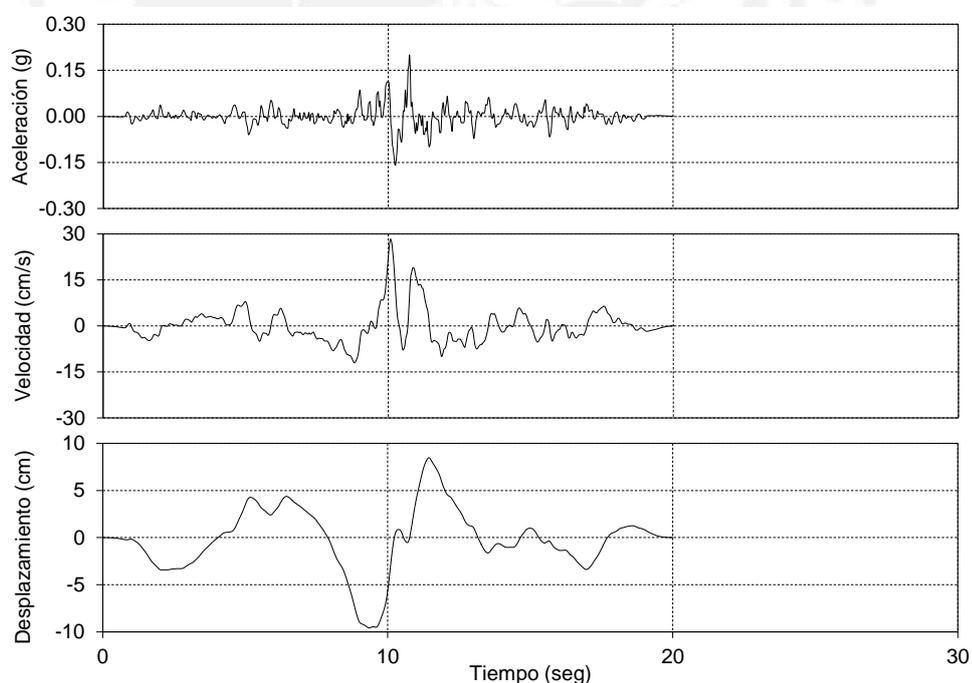


Figura B.21 Componente 0 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Gukasian, durante el terremoto de Spitak 1988.

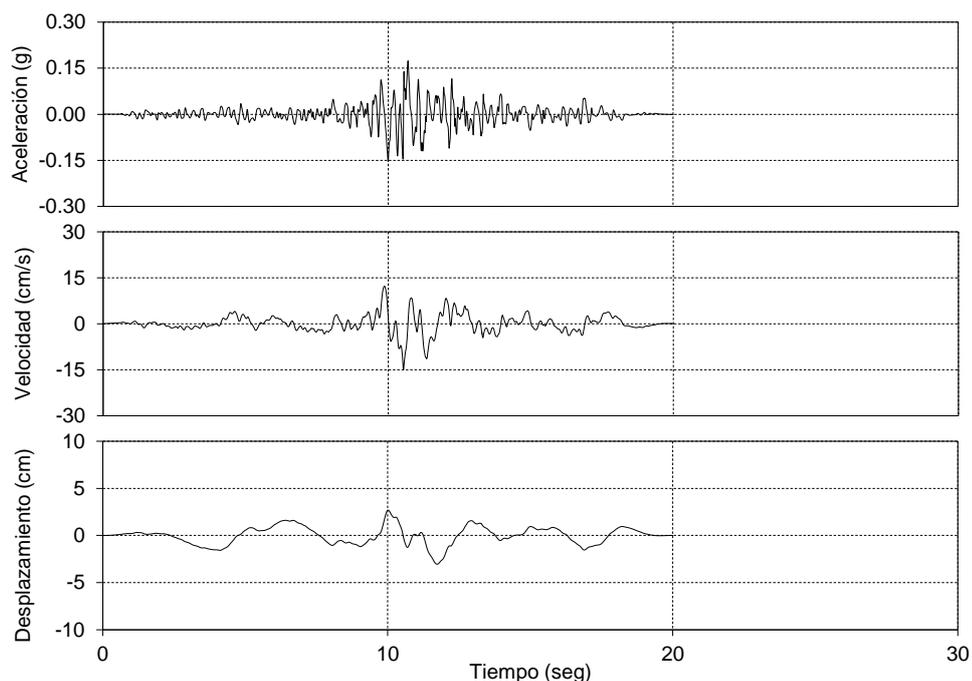


Figura B.22 Componente 90 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Gukasian, durante el terremoto de Spitak 1988.

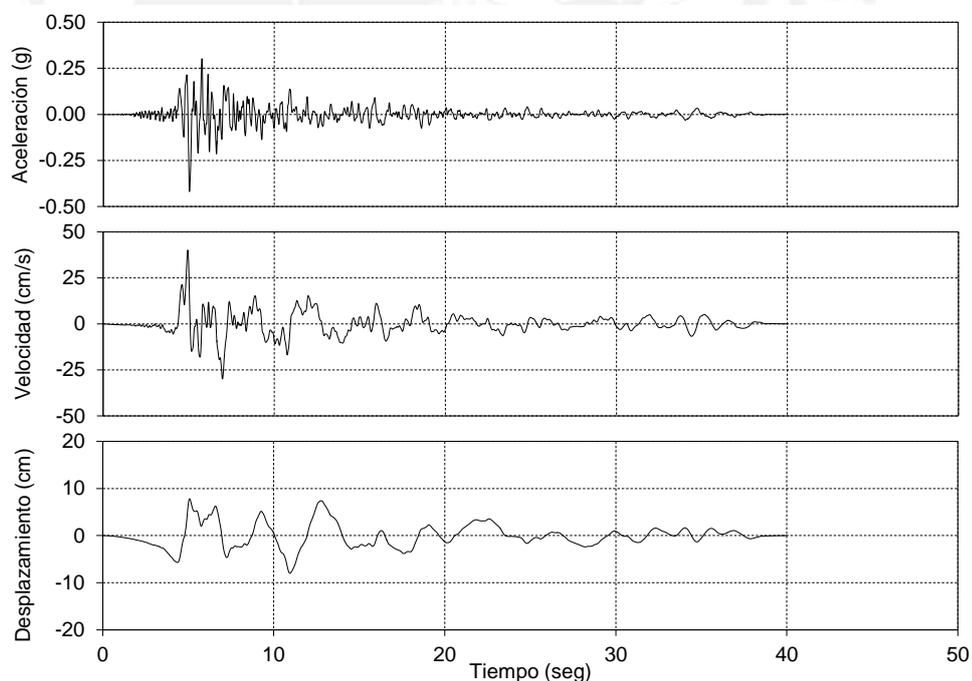


Figura B.23 Componente 0 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Gilroy Array #4, durante el terremoto de Loma Prieta 1989.

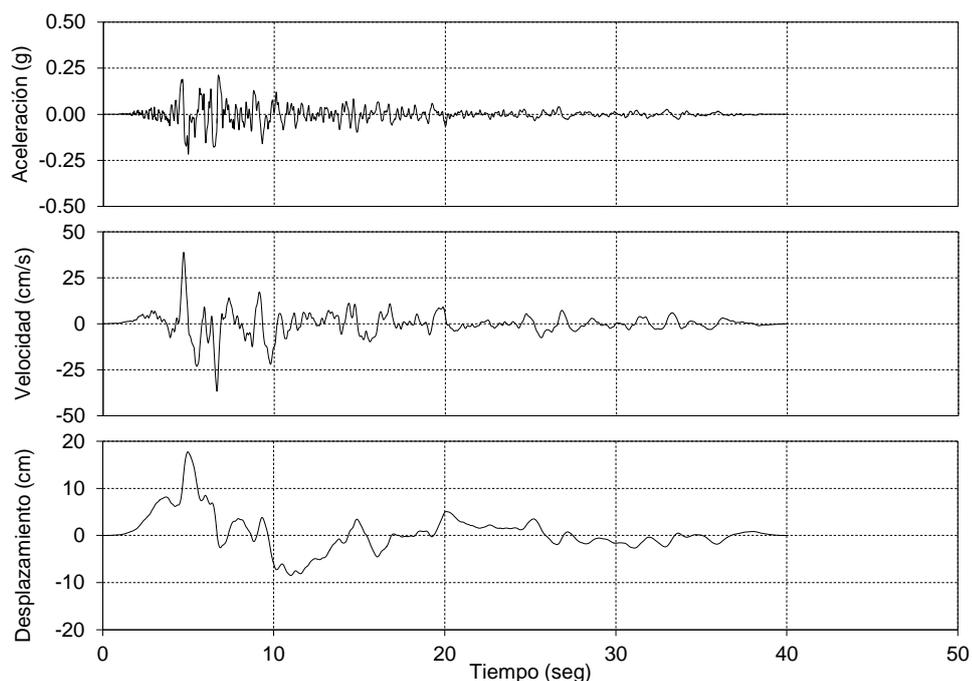


Figura B.24 Componente 90 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Gilroy Array #4, durante el terremoto de Loma Prieta 1989.

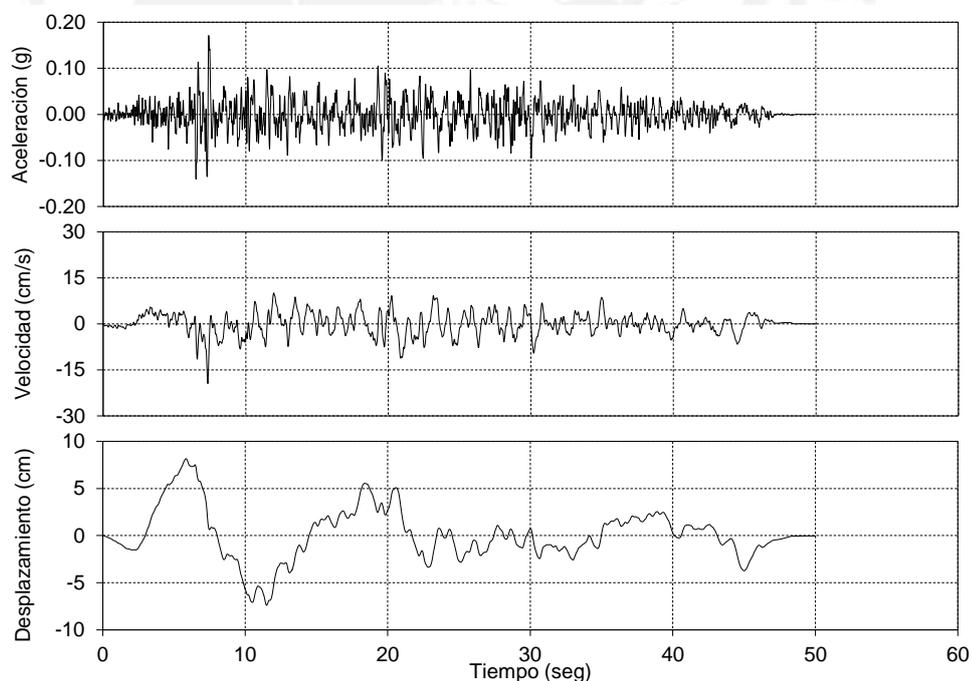


Figura B.25 Componente 0 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Desert Hot Springs, durante el terremoto de Landers 1992.

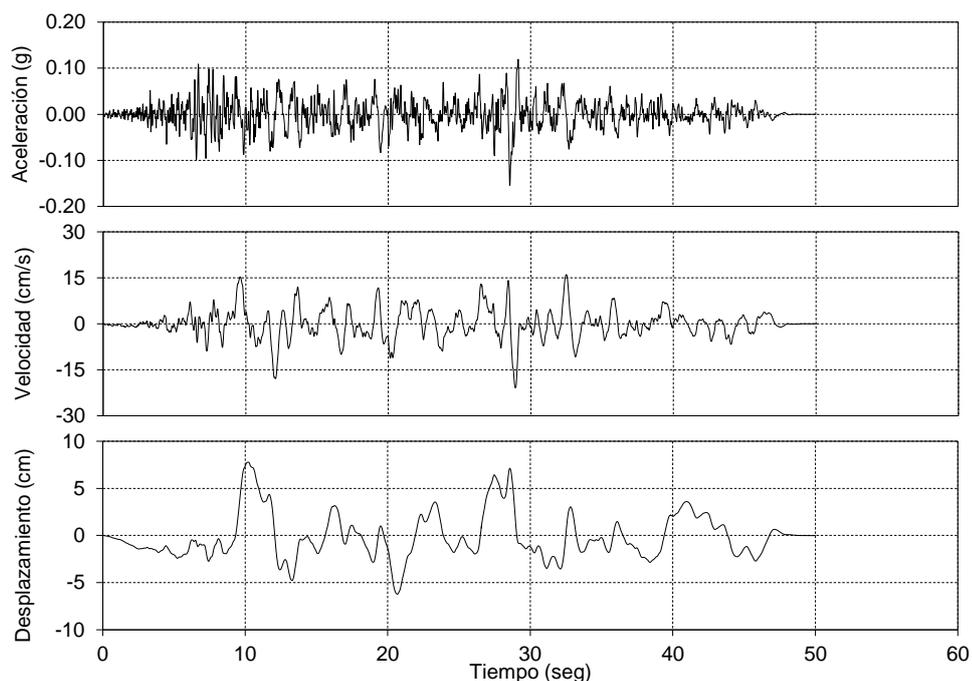


Figura B.26 Componente 90 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Desert Hot Springs, durante el terremoto de Landers 1992.

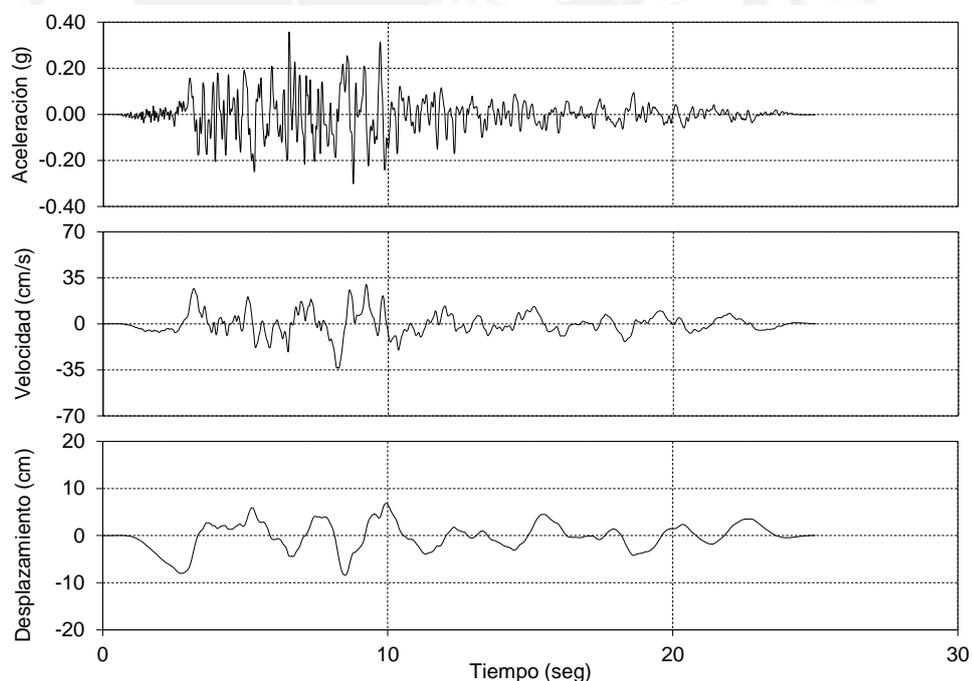


Figura B.27 Componente 106 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Canoga Park - Topanga Can, durante el terremoto de Northridge-01 1994.

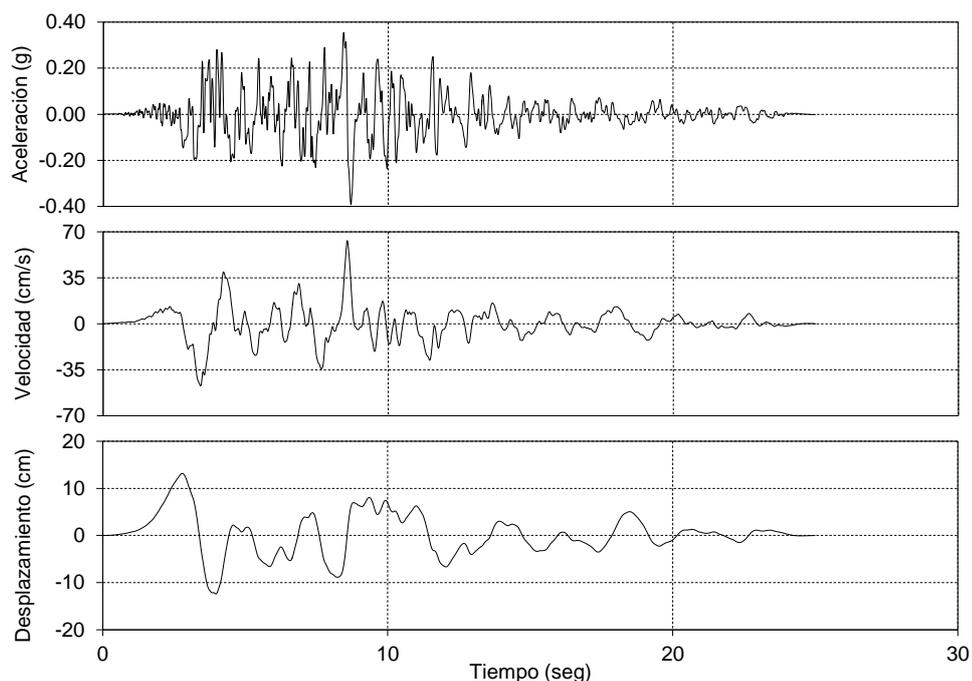


Figura B.28 Componente 196 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Canoga Park - Topanga Can, durante el terremoto de Northridge-01 1994.

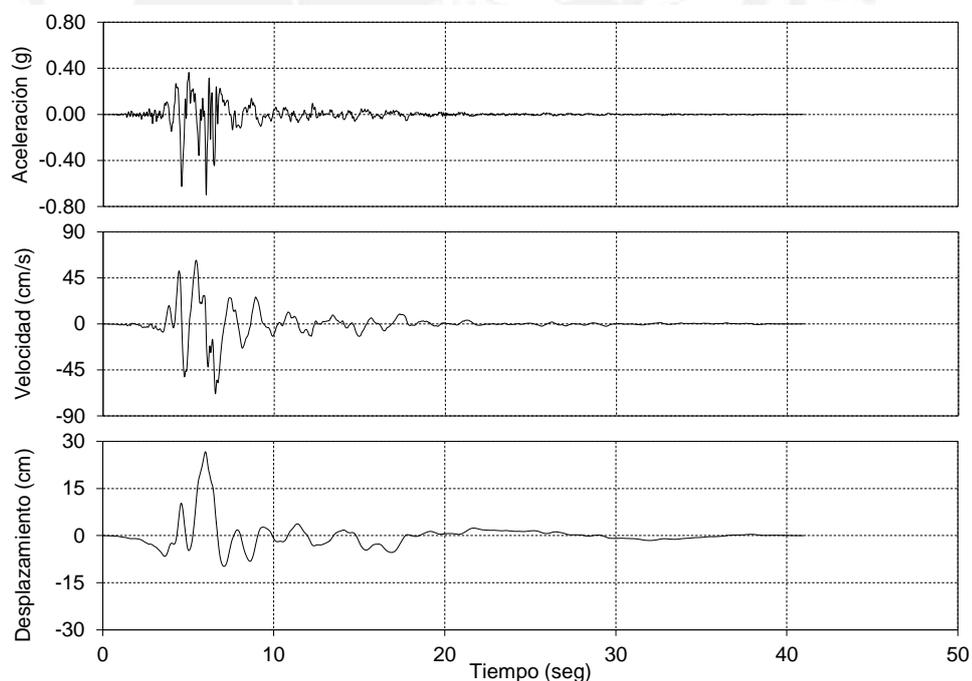


Figura B.29 Componente 0 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Takarazuka, durante el terremoto de Kobe 1995.

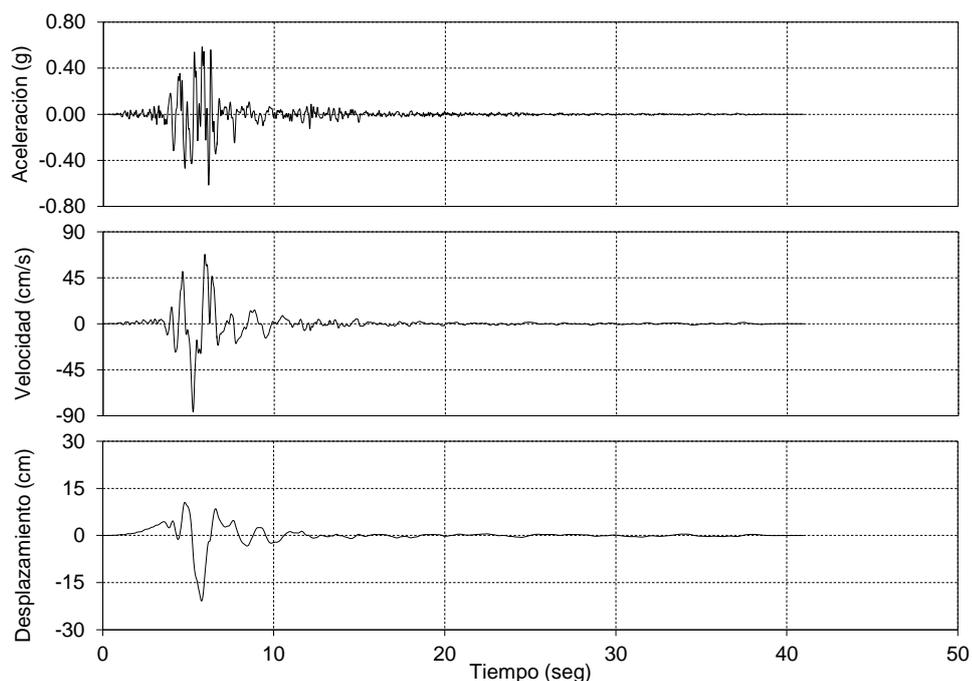


Figura B.30 Componente 90 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Takarazuka, durante el terremoto de Kobe 1995.

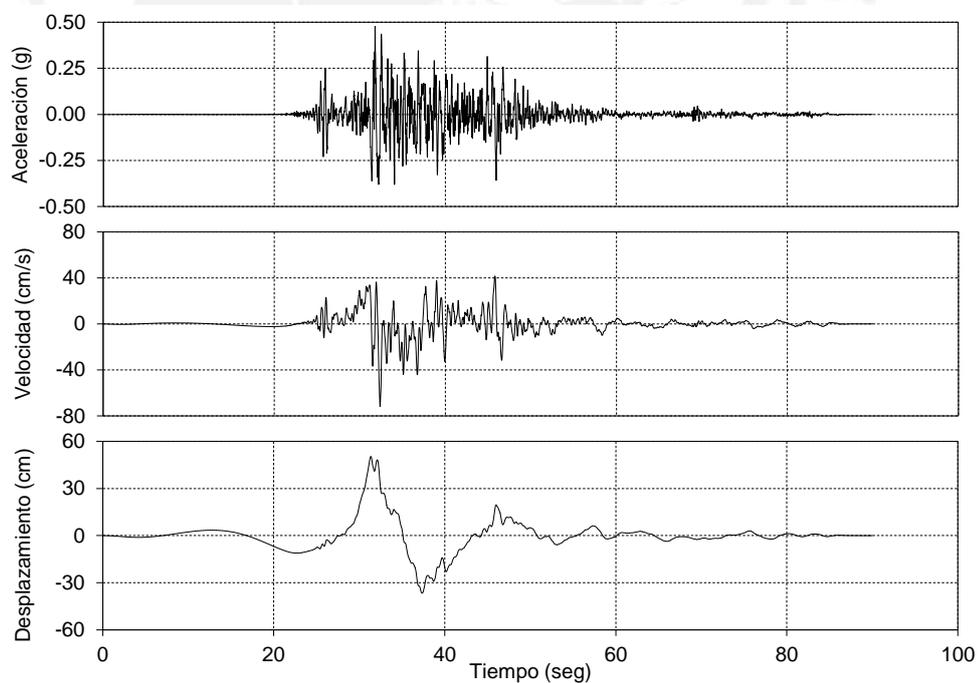


Figura B.31 Componente E de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación TCU072, durante el terremoto de Chi-Chi 1999.

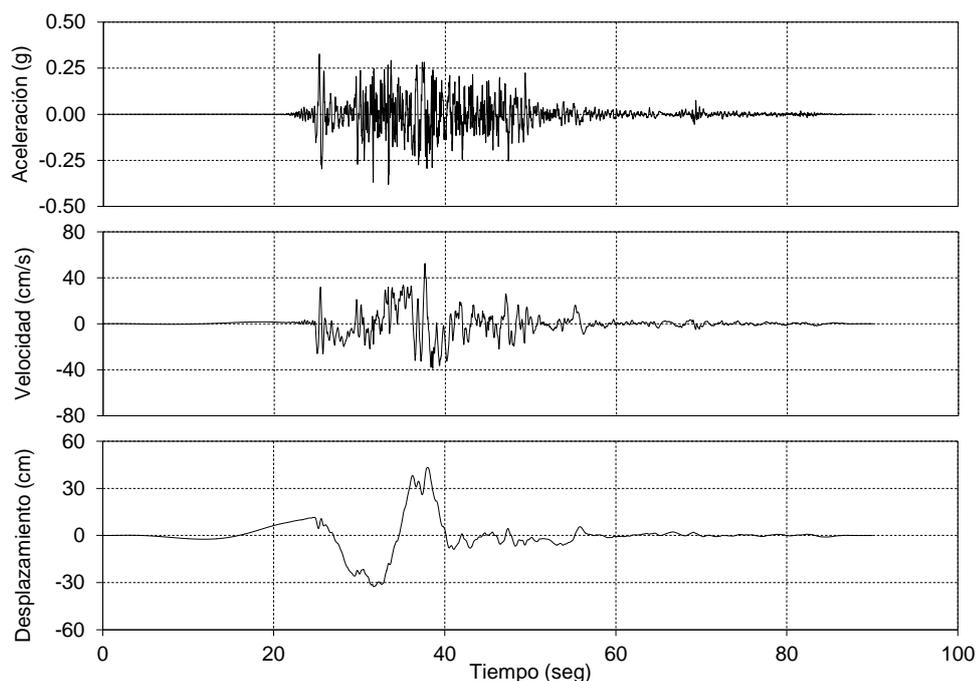


Figura B.32 Componente N de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación TCU072, durante el terremoto de Chi-Chi 1999.

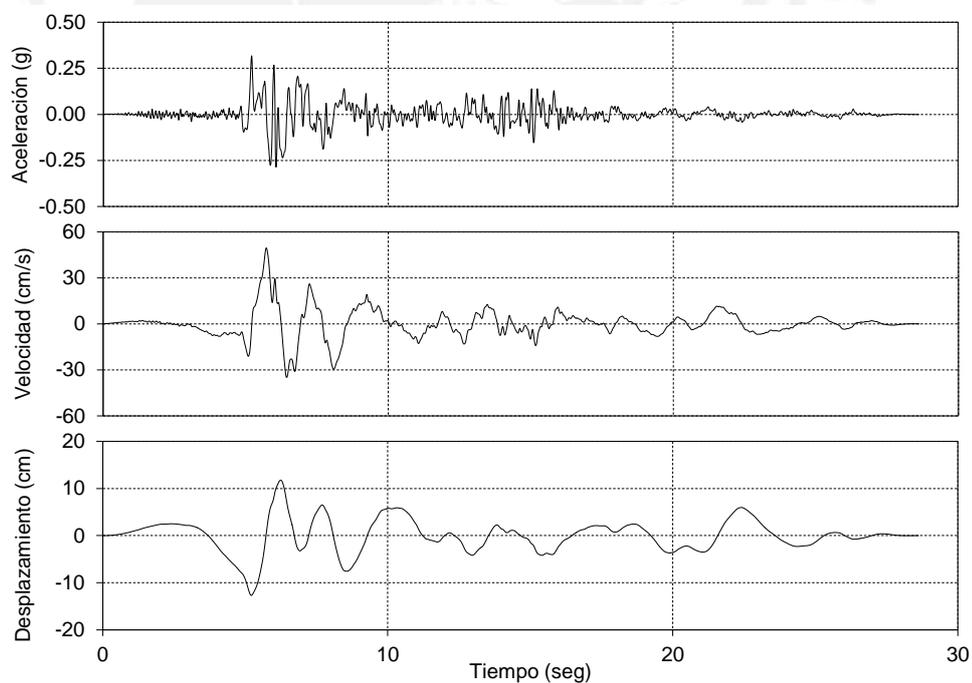


Figura B.33 Componente 270 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Centerville Beach, Naval Fac, durante el terremoto de Cape Mendocino 1992.

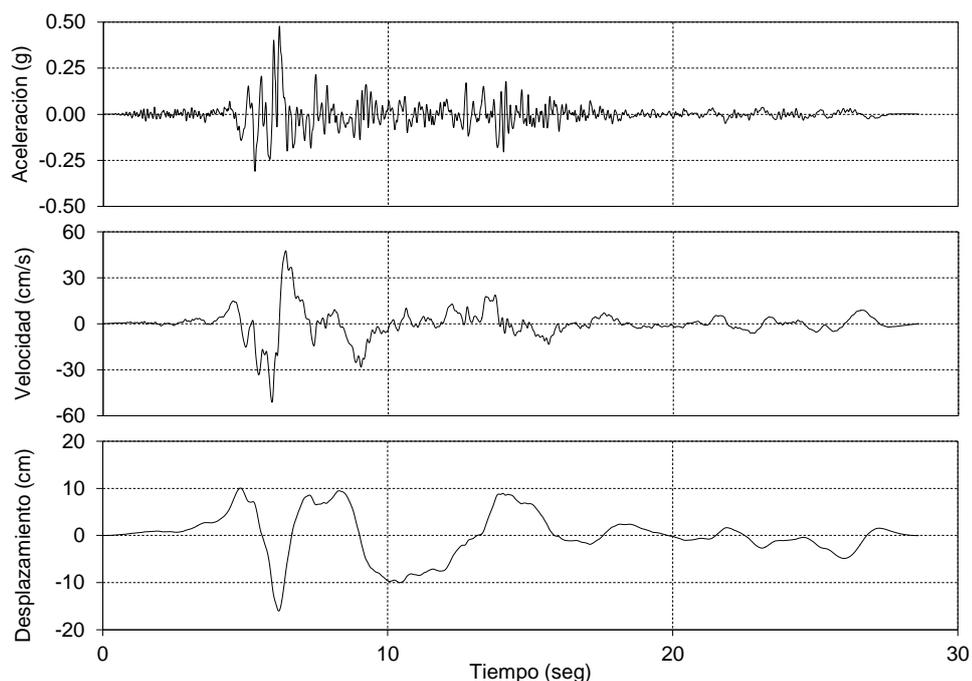


Figura B.34 Componente 360 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Centerville Beach, Naval Fac, durante el terremoto de Cape Mendocino 1992.

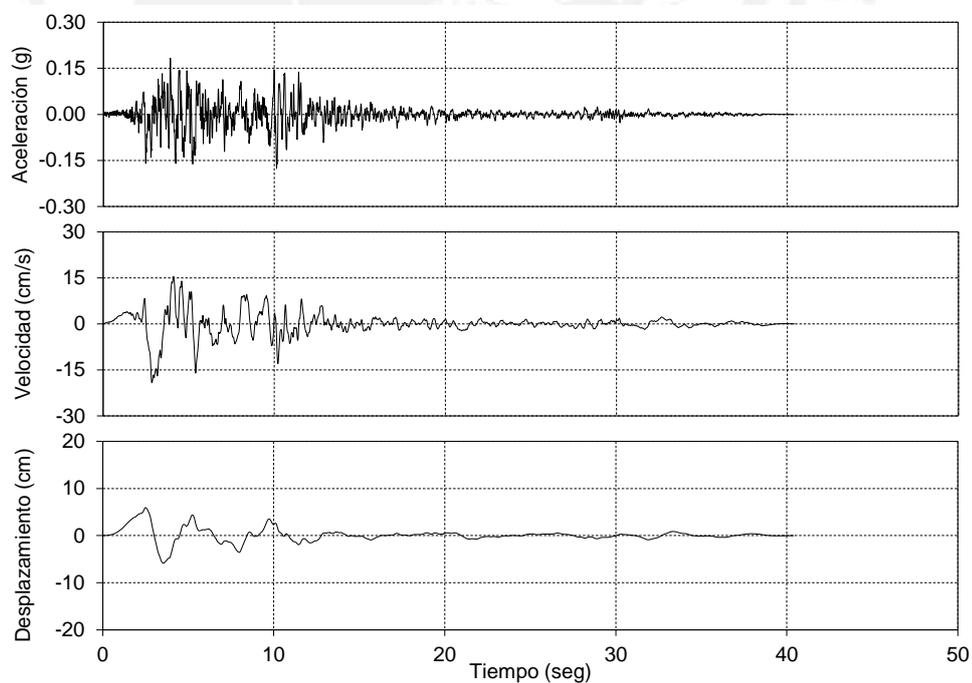


Figura B.35 Componente 0 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Ulcinj - Hotel Albatros, durante el terremoto de Montenegro 1979.

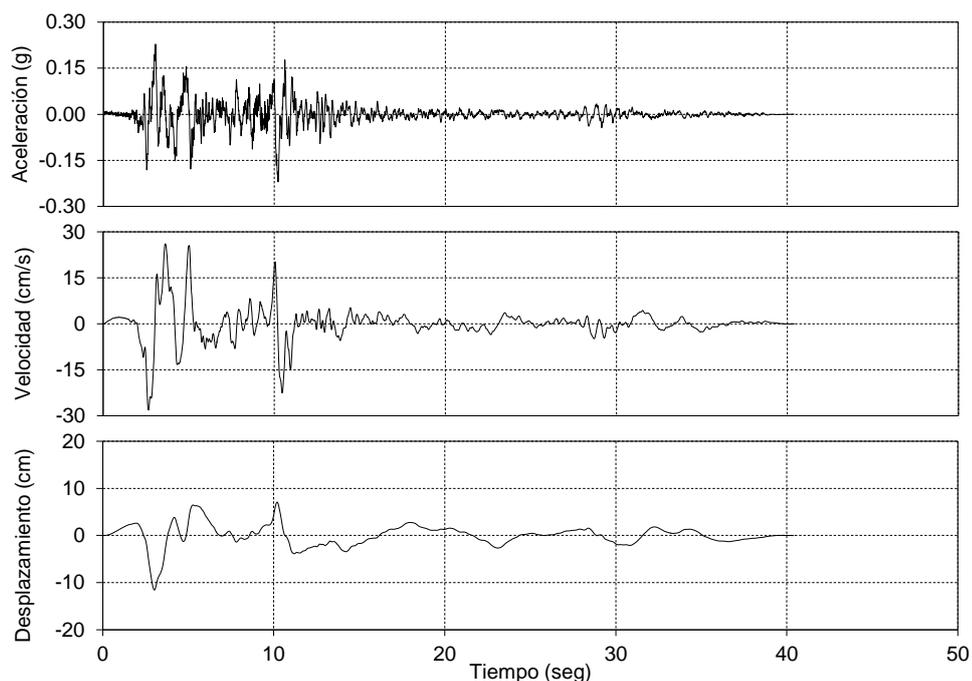


Figura B.36 Componente 90 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Ucinj - Hotel Albatros, durante el terremoto de Montenegro 1979.

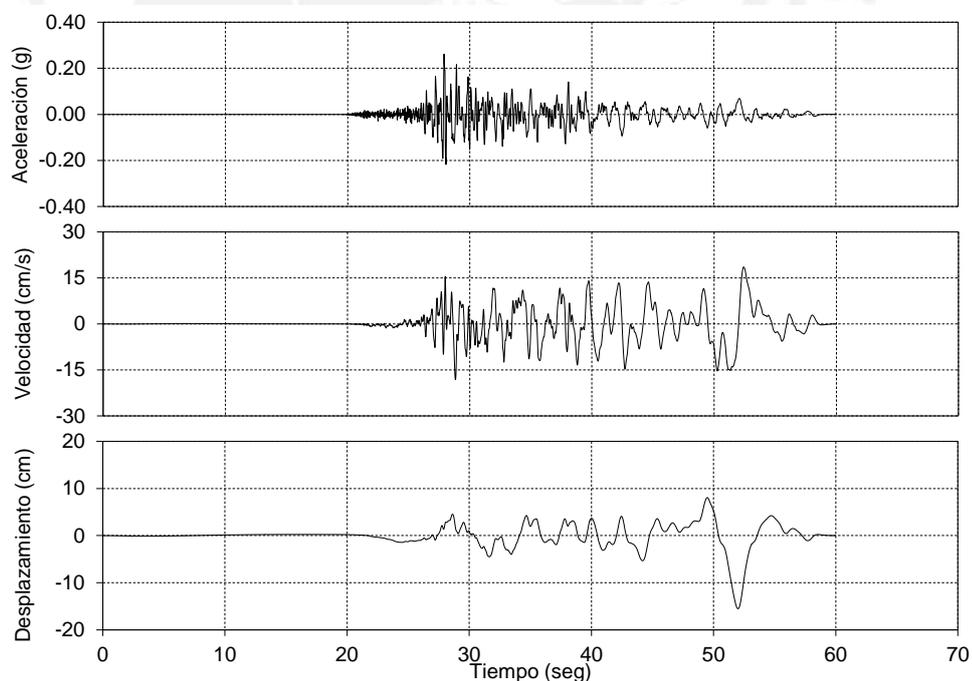


Figura B.37 Componente EW de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Sanjo Shinbori, durante el terremoto de Chuetsu-oki 2007.

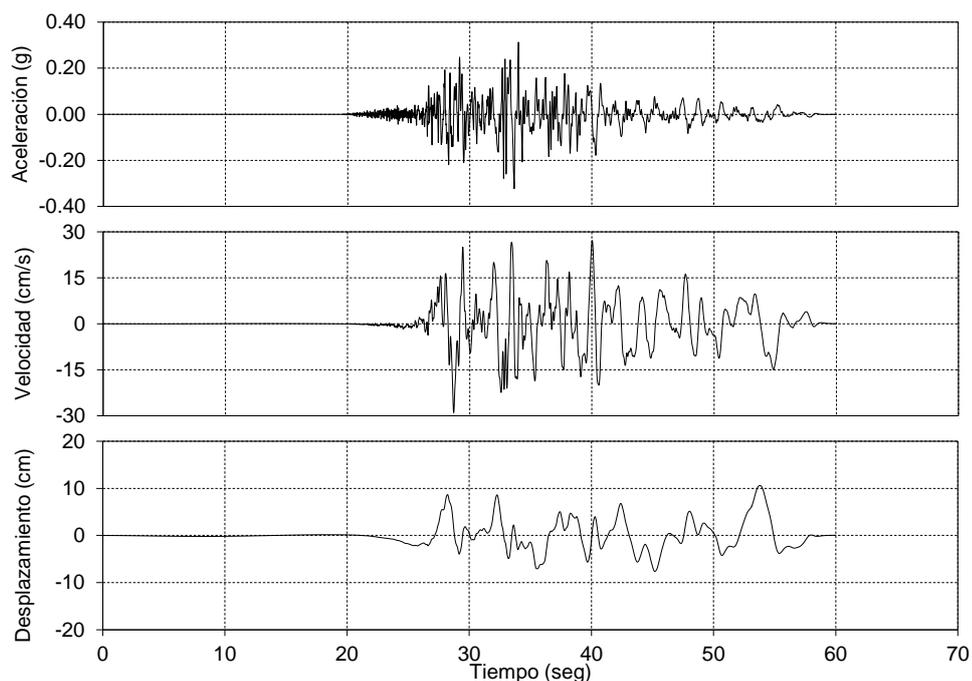


Figura B.38 Componente NS de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Sanjo Shinbori, durante el terremoto de Chuetsu-oki 2007.

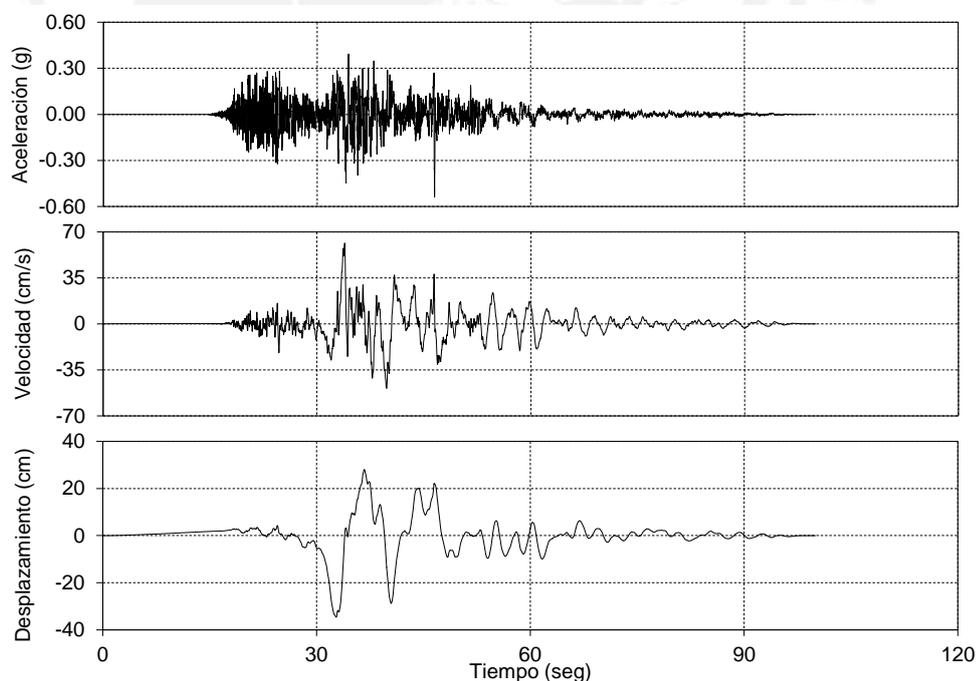


Figura B.39 Componente 0 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Michoacan de Ocampo, durante el terremoto de El Mayor-Cucapah 2010.

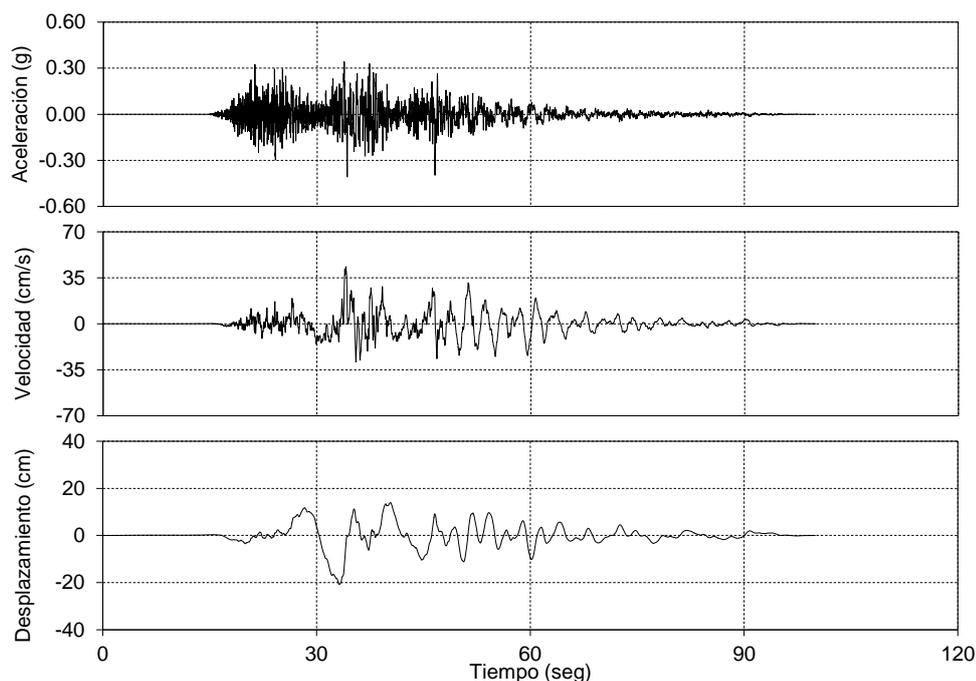


Figura B.40 Componente 90 de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación Michoacan de Ocampo, durante el terremoto de El Mayor-Cucapah 2010.

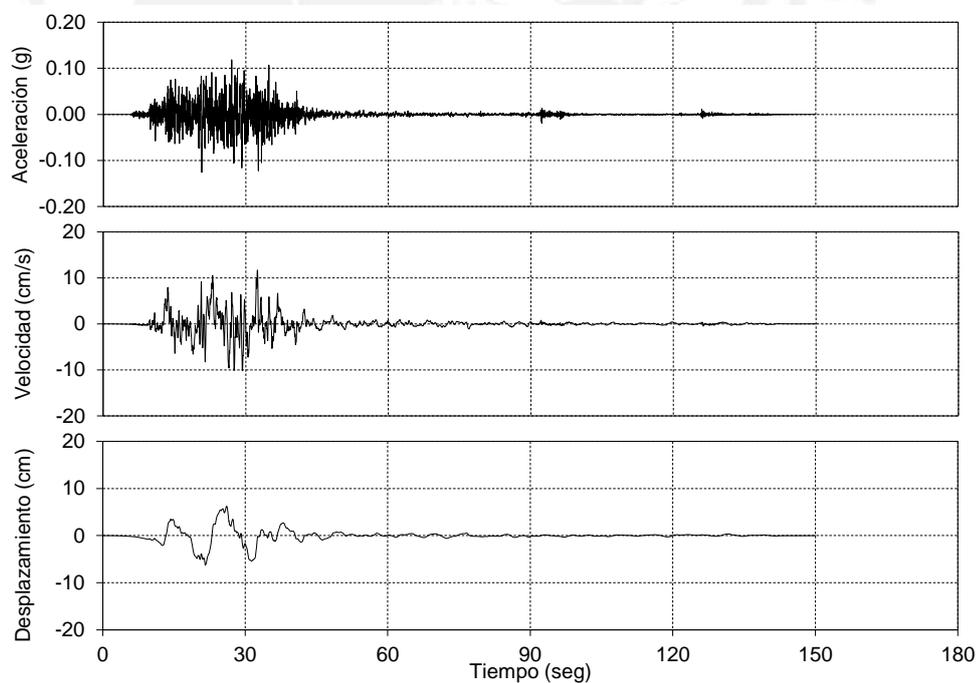


Figura B.41 Componente E de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación OXZ, durante el terremoto de Darfield 2010.

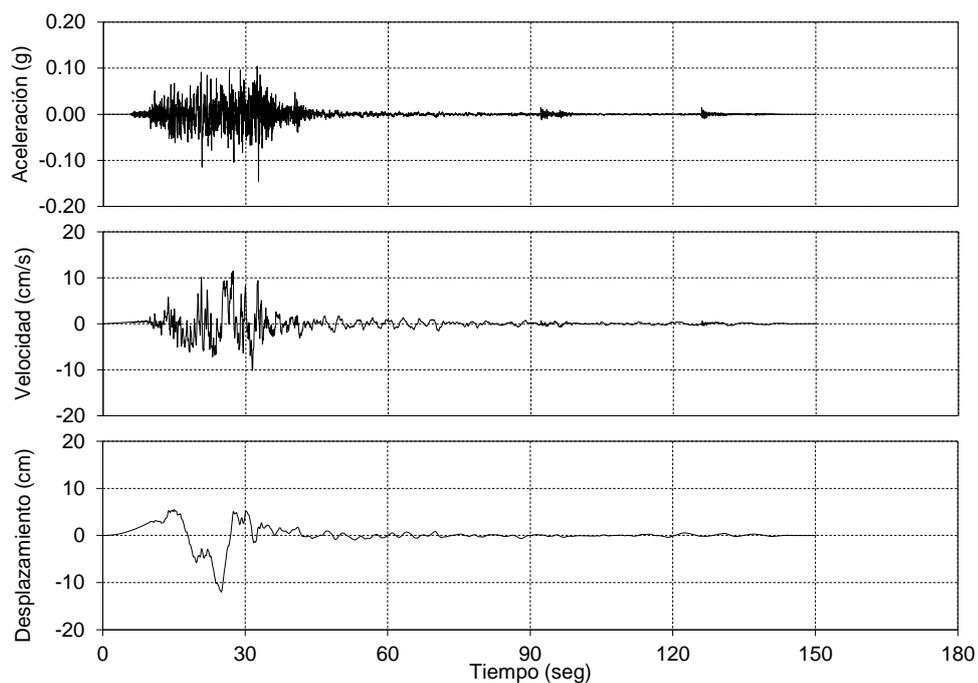


Figura B.42 Componente N de la aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal del suelo registrada en la estación OXZ, durante el terremoto de Darfield 2010.

ANEXO C

Las Figuras C.1 a C.3 muestran los espectros de pseudo-aceleración, pseudo-velocidad y desplazamiento correspondiente a la zona sísmica 4 y suelo tipo S_2 para el sismo de diseño, DE, propuesto para el diseño de sistemas con aislación sísmica en el Perú (Mendo, 2015). También se muestra el espectro resultante, SR, para los movimientos del suelo seleccionados y escalados y su promedio. Además, en la Figura C.4 se muestra el SR pseudo-aceleración-desplazamiento, donde las líneas radiales que parten desde el origen corresponden a periodos de vibración natural T_n constantes.



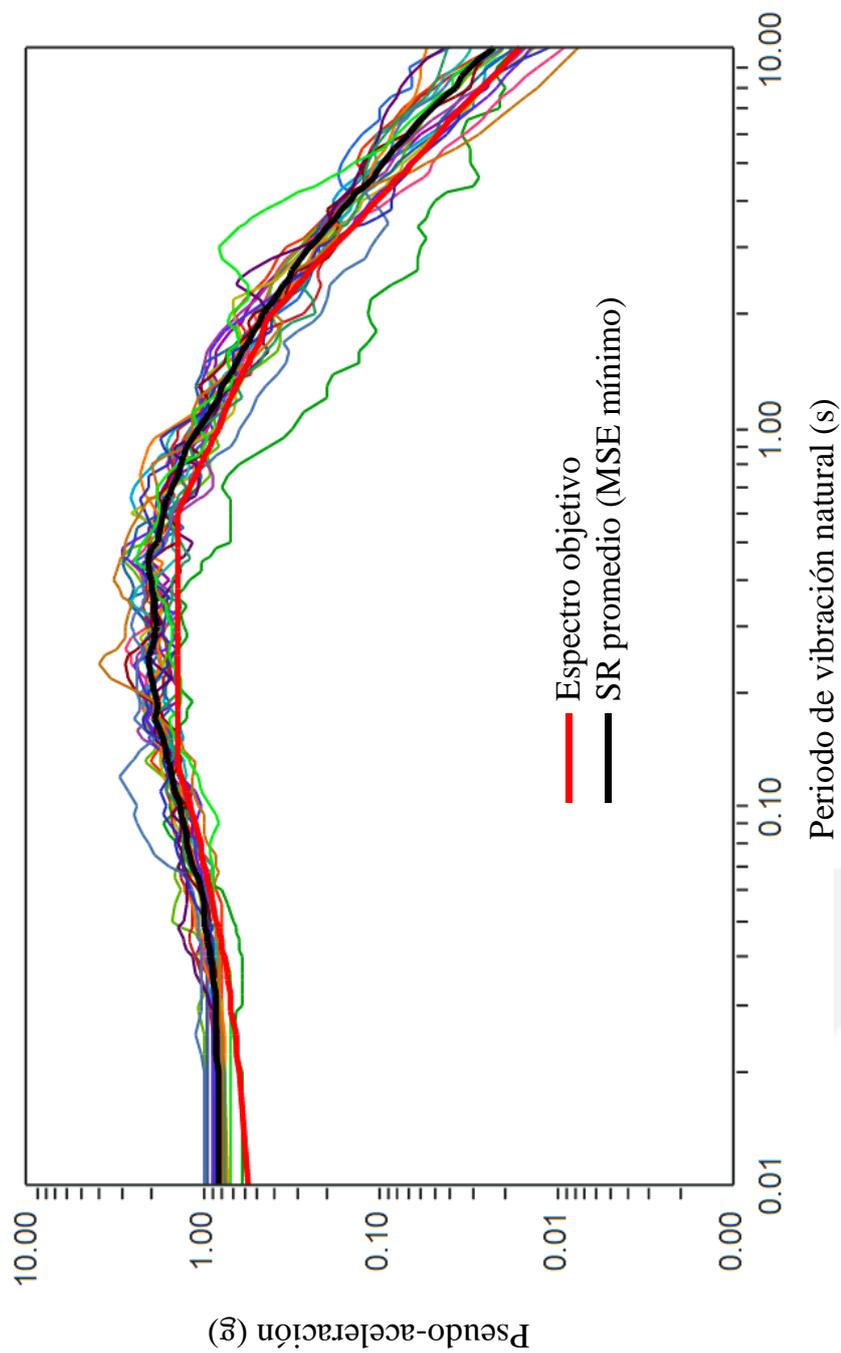


Figura C.1 Comparación de la pseudo-aceleración del SR para los movimientos del suelo seleccionados y escalados y su promedio con el espectro objetivo para el DE (razón de amortiguamiento de 5%).

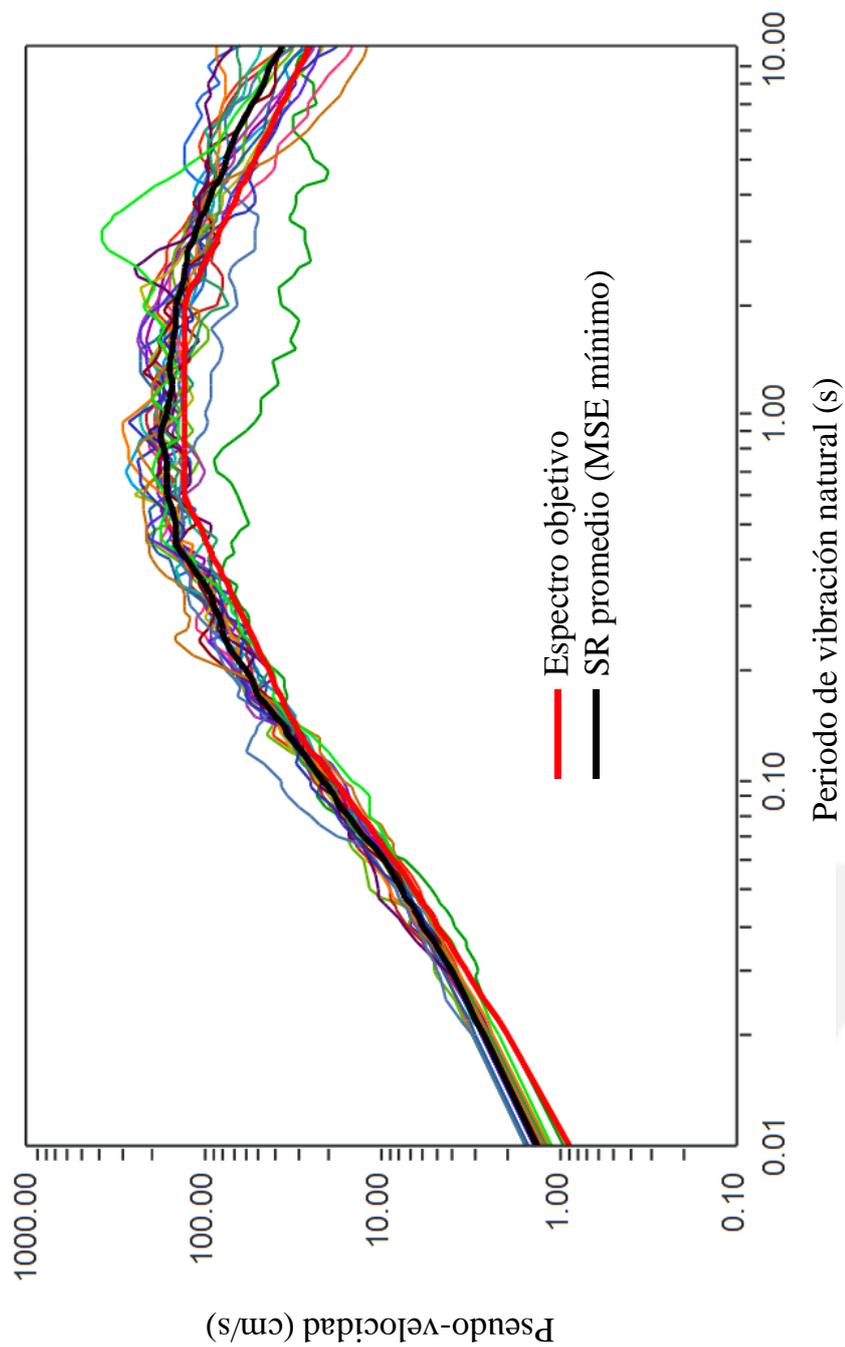


Figura C.2 Comparación de la pseudo-velocidad del SR para los movimientos del suelo seleccionados y escalados y su promedio con el espectro objetivo para el DE (razón de amortiguamiento de 5%).

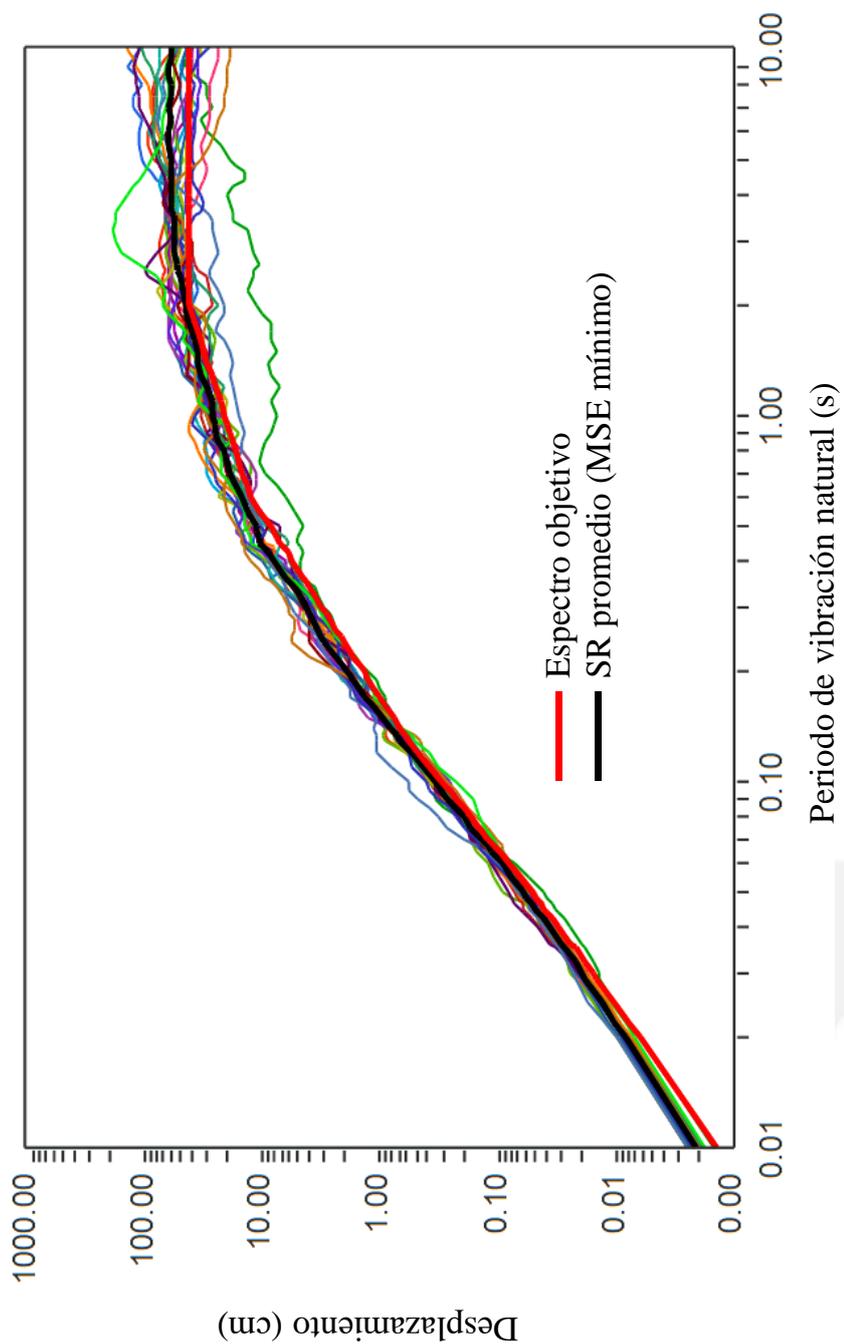


Figura C.3 Comparación del desplazamiento del SR para los movimientos del suelo seleccionados y escalados y su promedio con el espectro objetivo para el DE (razón de amortiguamiento de 5%).

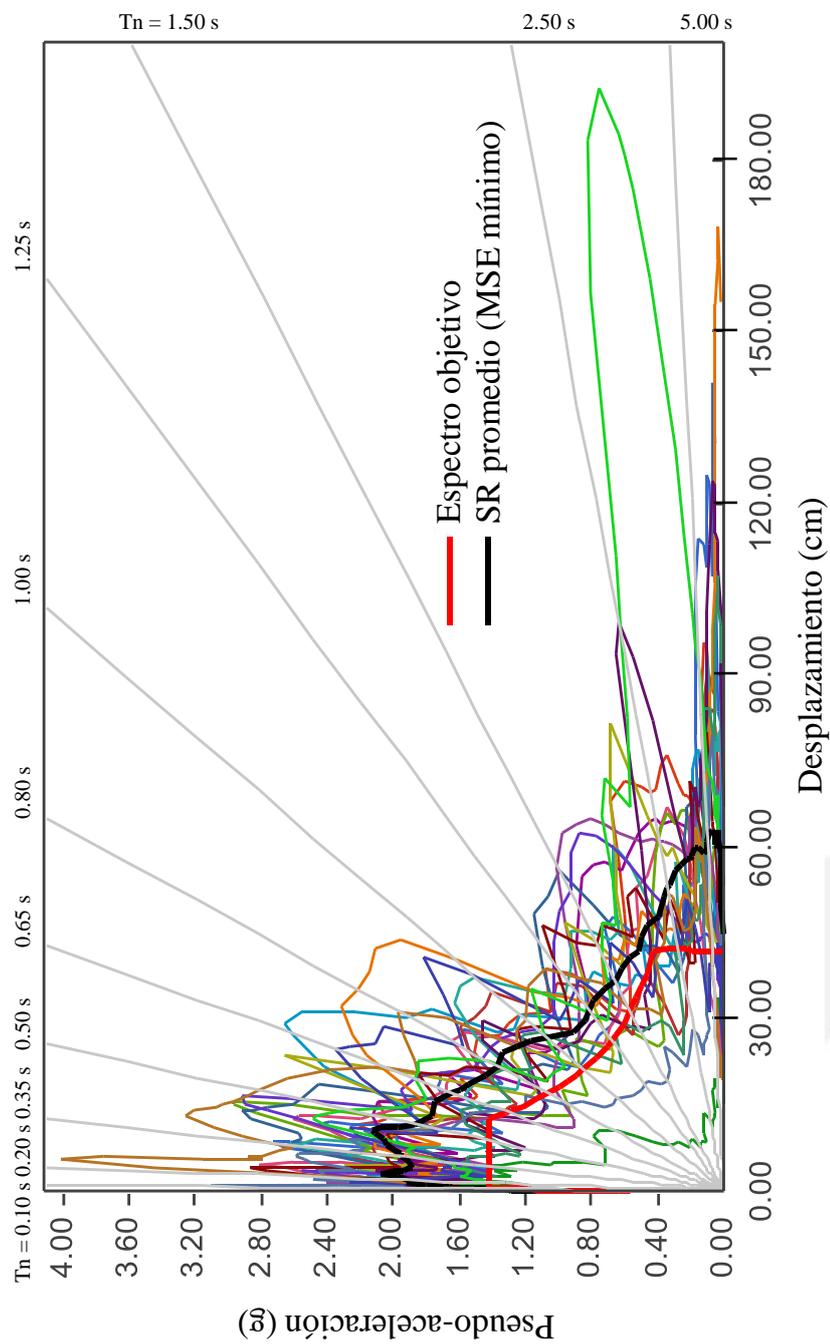


Figura C.4 Comparación pseudo-aceleración-desplazamiento del SR para los movimientos del suelo seleccionados y escalados y su promedio con el espectro objetivo para el DE (razón de amortiguamiento de 5%).

ANEXO D

Se utilizó el programa de análisis estructural SAP2000, para modelar los sistemas tanque-agua de base fija y base aislada, y realizar un análisis no lineal tiempo-historia (CSI 2014). El sistema de aislación ha sido modelado como resortes no lineales usando elementos NLLink, la pared del tanque ha sido modelado como elementos cáscara (comportamiento elástico). Las masas convectivas son conectadas a la pared del tanque por resortes y amortiguadores, que son modelados como resortes lineales usando elementos LLink, y la masa impulsiva es conectada a la pared del tanque por elementos rígidos usando elementos LLink. El coeficiente de rigidez de un elemento LLink es $k_{Link} = k_j/[2\cos^2(0) + 4\cos^2(\pi/8) + 4\cos^2(2\pi/8) + 4\cos^2(3\pi/8) + 2\cos^2(\pi/2)] = k_j/8$, y de manera similar el coeficiente de amortiguamiento es $c_{Link} = c_j/8$ (Figuras D.1). Las Figuras D.2 a D.7 muestran los modelos estructurales del sistema tanque-agua.

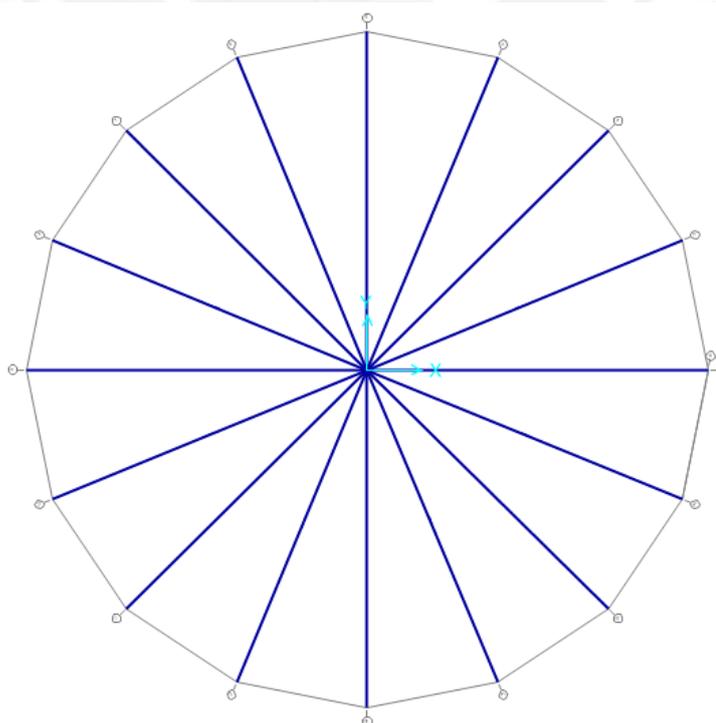


Figura D.1 Elementos LLink que conectan a la masa convectiva m_j con la pared del tanque.

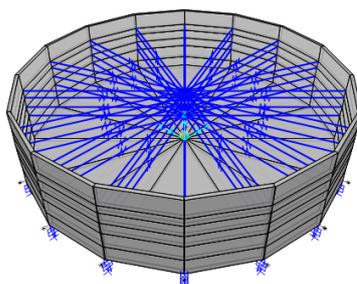


Figura D.2 Modelo estructural del sistema tanque-agua para $H/R = 0.5$,
 $e/R = 0.02$.

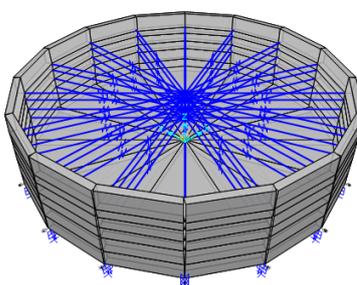


Figura D.3 Modelo estructural del sistema tanque-agua para $H/R = 0.5$,
 $e/R = 0.04$.

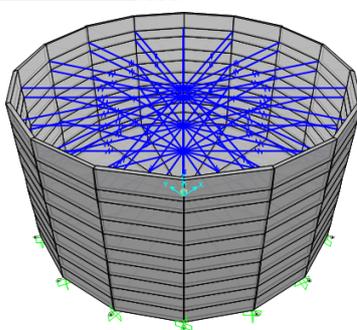


Figura D.4 Modelo estructural del sistema tanque-agua para $H/R = 1.0$,
 $e/R = 0.02$.

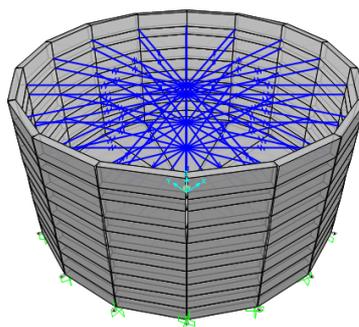


Figura D.5 Modelo estructural del sistema tanque-agua para $H/R = 1.0$,
 $e/R = 0.04$.

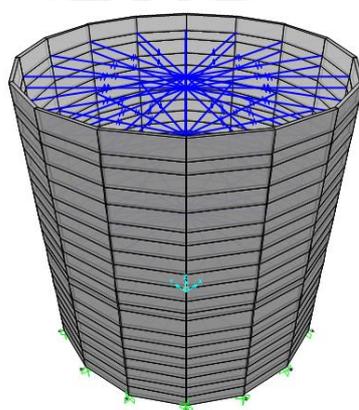


Figura D.6 Modelo estructural del sistema tanque-agua para $H/R = 2.0$,
 $e/R = 0.02$.

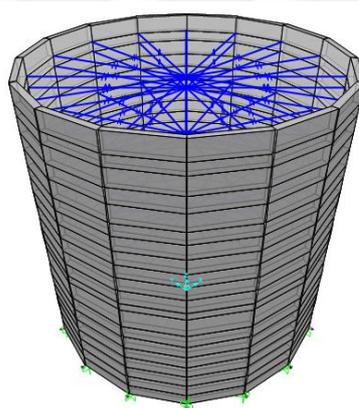


Figura D.7 Modelo estructural del sistema tanque-agua para $H/R = 2.0$,
 $e/R = 0.04$.

ANEXO E

En la Tabla E.1 se muestran los parámetros de estudio y los tipos de análisis. En la Tabla E.2 se muestran las propiedades físicas y geométricas de los sistemas tanque-agua utilizados. Además, en las Tablas E.3 a E.5 se muestran las respuestas sísmicas de diseño correspondientes a los casos de estudio donde se consideró la respuesta de cada caso como el valor promedio de las respuestas sísmicas obtenidas de los análisis tiempo-historia empleando los 21 pares de registros sísmicos del movimiento del suelo los cuales fueron seleccionados y escalados previamente.

Tabla E.1. Parámetros de estudio y tipos de análisis

| ID | Tipo de análisis | Parámetros del sistema tanque-agua | | Parámetros del sistema de aislación del tipo FPS | |
|----|--------------------------------|------------------------------------|-------|--|-------------|
| | | e/R | H/R | T_b (s) | μ_b |
| 1 | Base fija | 0.02 | 0.5 | 2 | 0.03 – 0.12 |
| 2 | Base aislada (bi-direccional) | 0.04 | 1 | 3 | 0.02 – 0.07 |
| 3 | Base aislada (uni-direccional) | --- | 2 | 4 | 0.02 – 0.04 |
| 4 | --- | --- | --- | --- | 0.01 – 0.02 |

(---) No hay dato

Tabla E.2. Propiedades de los sistemas tanque-agua

| H/R | e/R | e (m) | H (m) | R (m) | m_a (kg) | m_b (kg) | m_t (kg) | W (N) |
|-------|-------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|
| 0.5 | 0.02 | 0.20 | 5 | 10 | 1,570,796 | 301,593 | 1,872,389 | 18,368,138 |
| 0.5 | 0.04 | 0.40 | 5 | 10 | 1,570,796 | 603,186 | 2,173,982 | 21,326,765 |
| 1.0 | 0.02 | 0.20 | 10 | 10 | 3,141,593 | 452,389 | 3,593,982 | 35,256,963 |
| 1.0 | 0.04 | 0.40 | 10 | 10 | 3,141,593 | 904,779 | 4,046,371 | 39,694,903 |
| 2.0 | 0.02 | 0.20 | 20 | 10 | 6,283,185 | 753,982 | 7,037,168 | 69,034,614 |
| 2.0 | 0.04 | 0.40 | 20 | 10 | 6,283,185 | 1,507,964 | 7,791,150 | 76,431,179 |

Tabla E.3. Casos de estudio de base fija

| Caso | Tipo de análisis | e/R | H/R | T_b | μ_b | Fuerzas promedio | | | | Desplazamientos promedio | | | |
|------|------------------|-------|-------|-------|---------|----------------------------|--------|--|----------|--------------------------|----------|-------------|----------|
| | | | | | | Fuerza cortante basal (kN) | | Momento volcante de las paredes (kN m) | | Base del tanque (cm) | | Oleaje (cm) | |
| | | | | | | S_x | S_y | M_{yx} | M_{xy} | u_{bx} | u_{by} | d_{cx} | d_{cy} |
| 1 | 1 | 1 | 1 | --- | --- | 4,830 | 4,128 | 8,368 | 7,378 | 0 | 0 | 79 | 76 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | --- | --- | 18,054 | 16,913 | 73,283 | 69,892 | 0 | 0 | 96 | 91 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | --- | --- | 75,211 | 66,402 | 661,798 | 584,561 | 0 | 0 | 103 | 93 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | --- | --- | 6,715 | 5,599 | 10,638 | 9,147 | 0 | 0 | 79 | 76 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | --- | --- | 19,152 | 16,424 | 75,946 | 66,190 | 0 | 0 | 96 | 91 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | --- | --- | 72,926 | 69,609 | 655,245 | 628,086 | 0 | 0 | 102 | 93 |

Tabla E.4. Casos de estudio de base aislada (bi-direccional)

| Caso | Tipo de análisis | e/R | H/R | T _b | μ _b | Fuerzas promedio | | | | Desplazamientos promedio | | | |
|------|------------------|-----|-----|----------------|----------------|----------------------------|----------------|--|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | | Fuerza cortante basal (kN) | | Momento volcante de las paredes (kN m) | | Base del tanque (cm) | | Oleaje (cm) | |
| | | | | | | S _x | S _y | M _{yx} | M _{xy} | u _{bx} | u _{by} | d _{cx} | d _{cy} |
| 7 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,063 | 3,718 | 6,958 | 6,342 | 21 | 19 | 92 | 89 |
| 8 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3,808 | 3,479 | 6,540 | 5,934 | 18 | 16 | 86 | 85 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4,075 | 3,482 | 6,946 | 6,083 | 17 | 14 | 83 | 84 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4,868 | 4,046 | 8,379 | 6,982 | 18 | 15 | 86 | 85 |
| 11 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2,242 | 2,097 | 3,813 | 3,751 | 24 | 22 | 89 | 92 |
| 12 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2,229 | 2,181 | 3,918 | 3,923 | 21 | 21 | 83 | 88 |
| 13 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2,685 | 2,520 | 4,653 | 4,448 | 22 | 21 | 86 | 87 |
| 14 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | 3,438 | 3,127 | 5,868 | 5,356 | 25 | 23 | 94 | 92 |
| 15 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1,440 | 1,365 | 2,637 | 2,477 | 25 | 24 | 85 | 81 |
| 16 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1,690 | 1,574 | 2,928 | 2,815 | 25 | 24 | 87 | 83 |
| 17 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2,110 | 1,923 | 3,567 | 3,307 | 28 | 25 | 96 | 92 |
| 18 | 2 | 1 | 1 | 3 | 4 | 2,597 | 2,373 | 4,327 | 4,036 | 32 | 29 | 108 | 105 |
| 19 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 9,507 | 9,233 | 35,862 | 35,363 | 26 | 25 | 127 | 132 |
| 20 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 8,929 | 8,261 | 34,032 | 31,696 | 22 | 21 | 118 | 119 |
| 21 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 8,925 | 8,111 | 34,249 | 31,333 | 20 | 18 | 114 | 113 |
| 22 | 2 | 1 | 2 | 1 | 4 | 9,763 | 8,749 | 37,464 | 33,721 | 19 | 17 | 112 | 108 |
| 23 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4,969 | 4,553 | 18,713 | 17,846 | 28 | 26 | 135 | 136 |
| 24 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4,917 | 4,426 | 18,748 | 17,462 | 25 | 22 | 120 | 122 |
| 25 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 5,455 | 5,219 | 21,008 | 20,425 | 24 | 23 | 118 | 120 |
| 26 | 2 | 1 | 2 | 2 | 4 | 6,862 | 6,375 | 26,128 | 24,756 | 27 | 25 | 127 | 126 |
| 27 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3,219 | 2,825 | 12,827 | 11,672 | 30 | 26 | 109 | 110 |
| 28 | 2 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3,416 | 3,163 | 13,576 | 12,593 | 28 | 25 | 117 | 119 |
| 29 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4,105 | 3,968 | 15,993 | 15,456 | 29 | 28 | 139 | 140 |
| 30 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5,053 | 4,930 | 19,232 | 19,020 | 32 | 31 | 163 | 161 |
| 31 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 22,787 | 19,154 | 187,614 | 156,730 | 31 | 26 | 168 | 155 |
| 32 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 20,558 | 18,033 | 169,741 | 147,134 | 27 | 23 | 148 | 141 |
| 33 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 19,816 | 17,806 | 164,443 | 148,097 | 23 | 21 | 138 | 132 |
| 34 | 2 | 1 | 3 | 1 | 4 | 20,675 | 18,769 | 171,347 | 157,438 | 22 | 19 | 136 | 127 |
| 35 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 11,466 | 9,796 | 93,523 | 80,552 | 34 | 29 | 169 | 161 |
| 36 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2 | 10,934 | 9,694 | 90,120 | 79,980 | 29 | 25 | 156 | 149 |
| 37 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 11,879 | 10,552 | 97,112 | 88,047 | 28 | 24 | 156 | 151 |
| 38 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 14,134 | 12,878 | 115,814 | 107,814 | 29 | 26 | 165 | 160 |
| 39 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 7,309 | 6,153 | 61,751 | 54,534 | 36 | 30 | 138 | 126 |
| 40 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 7,897 | 6,820 | 65,811 | 58,541 | 34 | 29 | 144 | 141 |
| 41 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 9,247 | 8,220 | 75,576 | 70,291 | 36 | 30 | 155 | 163 |
| 42 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 10,966 | 10,302 | 89,936 | 85,256 | 37 | 33 | 176 | 181 |
| 43 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 5,328 | 4,699 | 8,251 | 7,474 | 24 | 21 | 99 | 96 |
| 44 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4,765 | 4,258 | 7,539 | 6,800 | 19 | 17 | 90 | 88 |
| 45 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 4,873 | 4,468 | 7,751 | 7,116 | 17 | 16 | 87 | 87 |
| 46 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 5,809 | 5,155 | 9,222 | 8,270 | 18 | 16 | 87 | 88 |
| 47 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2,735 | 2,456 | 4,200 | 4,055 | 25 | 23 | 100 | 99 |
| 48 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2,861 | 2,710 | 4,427 | 4,399 | 23 | 22 | 91 | 94 |
| 49 | 2 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3,332 | 3,265 | 5,197 | 5,226 | 23 | 23 | 93 | 95 |
| 50 | 2 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4,086 | 4,019 | 6,370 | 6,347 | 26 | 25 | 101 | 102 |
| 51 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1,807 | 1,629 | 2,984 | 2,755 | 28 | 25 | 90 | 90 |
| 52 | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2,088 | 1,923 | 3,380 | 3,153 | 27 | 25 | 98 | 93 |
| 53 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2,605 | 2,405 | 4,096 | 3,808 | 29 | 27 | 109 | 103 |
| 54 | 2 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3,224 | 2,918 | 4,948 | 4,588 | 33 | 30 | 124 | 117 |
| 55 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 11,134 | 10,517 | 41,296 | 39,466 | 27 | 25 | 134 | 135 |
| 56 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 10,039 | 9,482 | 37,283 | 35,859 | 22 | 21 | 121 | 121 |
| 57 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 10,264 | 9,483 | 38,422 | 35,791 | 21 | 19 | 117 | 115 |
| 58 | 2 | 2 | 2 | 1 | 4 | 11,533 | 10,387 | 43,197 | 39,324 | 20 | 18 | 117 | 110 |
| 59 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 5,532 | 5,065 | 20,658 | 19,460 | 28 | 26 | 138 | 136 |
| 60 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5,761 | 5,143 | 21,380 | 19,489 | 25 | 23 | 125 | 128 |
| 61 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 6,463 | 5,951 | 24,145 | 22,406 | 25 | 23 | 124 | 125 |
| 62 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 8,024 | 7,478 | 30,005 | 28,001 | 27 | 25 | 132 | 133 |
| 63 | 2 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3,712 | 3,275 | 14,569 | 13,054 | 31 | 27 | 113 | 113 |
| 64 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4,055 | 3,725 | 15,559 | 14,373 | 29 | 26 | 121 | 126 |
| 65 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4,812 | 4,655 | 18,274 | 17,667 | 30 | 28 | 144 | 149 |
| 66 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5,907 | 5,753 | 21,808 | 21,865 | 33 | 32 | 172 | 178 |
| 67 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | 25,450 | 21,463 | 210,155 | 176,501 | 32 | 27 | 171 | 158 |
| 68 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 22,747 | 20,008 | 187,862 | 163,936 | 27 | 23 | 149 | 142 |
| 69 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 22,172 | 19,977 | 183,943 | 166,073 | 23 | 21 | 138 | 133 |
| 70 | 2 | 2 | 3 | 1 | 4 | 23,428 | 21,373 | 194,830 | 179,430 | 22 | 20 | 136 | 129 |
| 71 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 12,861 | 10,899 | 105,088 | 89,444 | 34 | 29 | 175 | 164 |
| 72 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 12,296 | 10,881 | 101,318 | 89,656 | 29 | 25 | 160 | 151 |
| 73 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 13,548 | 12,053 | 110,261 | 100,188 | 29 | 25 | 161 | 155 |
| 74 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 16,251 | 14,836 | 133,613 | 123,972 | 30 | 27 | 172 | 166 |
| 75 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 8,115 | 6,905 | 68,150 | 60,543 | 36 | 30 | 141 | 128 |
| 76 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 8,947 | 7,798 | 74,277 | 66,433 | 35 | 29 | 150 | 146 |
| 77 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 10,491 | 9,471 | 86,138 | 80,549 | 36 | 30 | 163 | 171 |
| 78 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 12,562 | 11,827 | 102,865 | 99,157 | 38 | 34 | 184 | 192 |

Tabla E.5. Casos de estudio de base aislada (uni-direccional)

| Caso | Tipo de análisis | e/R | H/R | T _b | μ _b | Fuerzas promedio | | | | Desplazamientos promedio | | | |
|------|------------------|-----|-----|----------------|----------------|----------------------------|----------------|--|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | | Fuerza cortante basal (kN) | | Momento volcante de las paredes (kN m) | | Base del tanque (cm) | | Oleaje (cm) | |
| | | | | | | S _x | S _y | M _{yx} | M _{xy} | u _{bx} | u _{by} | d _{cx} | d _{cy} |
| 79 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4,042 | 3,803 | 6,963 | 6,454 | 20 | 19 | 91 | 89 |
| 80 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3,930 | 3,602 | 6,791 | 6,170 | 18 | 16 | 87 | 84 |
| 81 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4,325 | 3,766 | 7,422 | 6,535 | 18 | 15 | 86 | 84 |
| 82 | 3 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5,077 | 4,475 | 8,746 | 7,711 | 19 | 16 | 88 | 85 |
| 83 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2,272 | 2,222 | 3,888 | 3,916 | 24 | 23 | 89 | 91 |
| 84 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2,367 | 2,386 | 4,131 | 4,212 | 21 | 22 | 86 | 88 |
| 85 | 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2,868 | 2,778 | 4,984 | 4,850 | 23 | 22 | 91 | 89 |
| 86 | 3 | 1 | 1 | 2 | 4 | 3,633 | 3,399 | 6,210 | 5,797 | 27 | 25 | 99 | 94 |
| 87 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1,530 | 1,451 | 2,772 | 2,591 | 26 | 25 | 90 | 81 |
| 88 | 3 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1,861 | 1,681 | 3,167 | 2,997 | 28 | 24 | 94 | 84 |
| 89 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2,265 | 2,029 | 3,765 | 3,540 | 30 | 26 | 102 | 95 |
| 90 | 3 | 1 | 1 | 3 | 4 | 2,742 | 2,466 | 4,548 | 4,245 | 33 | 30 | 114 | 107 |
| 91 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 9,545 | 9,244 | 35,998 | 35,415 | 25 | 24 | 125 | 131 |
| 92 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 | 9,101 | 8,397 | 34,722 | 32,388 | 22 | 20 | 118 | 117 |
| 93 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 9,229 | 8,546 | 35,316 | 33,114 | 20 | 19 | 116 | 113 |
| 94 | 3 | 1 | 2 | 1 | 4 | 10,188 | 9,633 | 39,318 | 37,379 | 20 | 18 | 115 | 108 |
| 95 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 5,082 | 4,715 | 19,196 | 18,438 | 28 | 26 | 133 | 133 |
| 96 | 3 | 1 | 2 | 2 | 2 | 5,204 | 4,797 | 19,846 | 18,812 | 26 | 23 | 124 | 121 |
| 97 | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 5,933 | 5,572 | 22,914 | 21,843 | 26 | 24 | 126 | 122 |
| 98 | 3 | 1 | 2 | 2 | 4 | 7,374 | 6,811 | 28,551 | 26,892 | 29 | 26 | 133 | 129 |
| 99 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3,334 | 3,026 | 13,319 | 12,294 | 31 | 27 | 114 | 113 |
| 100 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 3,664 | 3,595 | 14,626 | 14,069 | 29 | 28 | 128 | 130 |
| 101 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4,360 | 4,380 | 17,030 | 17,199 | 30 | 31 | 149 | 153 |
| 102 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5,234 | 5,268 | 20,283 | 20,770 | 33 | 34 | 173 | 174 |
| 103 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 22,622 | 19,309 | 185,678 | 157,844 | 31 | 26 | 163 | 152 |
| 104 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 20,830 | 18,847 | 171,942 | 154,715 | 26 | 23 | 145 | 139 |
| 105 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 20,239 | 19,189 | 168,432 | 160,877 | 23 | 22 | 137 | 130 |
| 106 | 3 | 1 | 3 | 1 | 4 | 21,598 | 20,532 | 182,898 | 175,295 | 22 | 21 | 136 | 126 |
| 107 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 11,482 | 10,091 | 94,040 | 82,753 | 33 | 29 | 167 | 159 |
| 108 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 11,419 | 10,469 | 93,878 | 87,190 | 29 | 26 | 161 | 154 |
| 109 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 12,696 | 12,024 | 107,037 | 105,420 | 29 | 27 | 167 | 159 |
| 110 | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 15,099 | 14,558 | 131,971 | 130,834 | 31 | 30 | 179 | 170 |
| 111 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 7,491 | 6,432 | 63,698 | 57,089 | 36 | 30 | 143 | 133 |
| 112 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 8,422 | 7,280 | 70,377 | 63,393 | 36 | 30 | 154 | 151 |
| 113 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 9,755 | 8,787 | 86,554 | 81,314 | 37 | 32 | 166 | 173 |
| 114 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 11,456 | 10,782 | 104,721 | 100,328 | 39 | 35 | 184 | 192 |
| 115 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 5,242 | 4,750 | 8,168 | 7,518 | 23 | 20 | 99 | 95 |
| 116 | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4,835 | 4,608 | 7,669 | 7,299 | 19 | 18 | 90 | 87 |
| 117 | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 5,113 | 4,906 | 8,161 | 7,765 | 18 | 17 | 88 | 86 |
| 118 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4 | 6,173 | 5,765 | 9,852 | 9,152 | 19 | 18 | 90 | 89 |
| 119 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2,830 | 2,613 | 4,348 | 4,248 | 25 | 23 | 100 | 97 |
| 120 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3,052 | 2,975 | 4,701 | 4,723 | 24 | 23 | 94 | 94 |
| 121 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3,554 | 3,519 | 5,543 | 5,614 | 25 | 24 | 97 | 97 |
| 122 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 4,404 | 4,359 | 6,883 | 6,922 | 28 | 27 | 105 | 104 |
| 123 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1,906 | 1,778 | 3,105 | 2,951 | 28 | 26 | 95 | 91 |
| 124 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 2,248 | 2,156 | 3,580 | 3,437 | 28 | 27 | 107 | 98 |
| 125 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2,771 | 2,610 | 4,326 | 4,129 | 31 | 29 | 119 | 108 |
| 126 | 3 | 2 | 1 | 3 | 4 | 3,367 | 3,113 | 5,196 | 4,906 | 35 | 32 | 135 | 121 |
| 127 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 11,038 | 10,604 | 40,766 | 39,609 | 26 | 25 | 130 | 133 |
| 128 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 10,333 | 9,713 | 38,452 | 36,683 | 22 | 21 | 120 | 119 |
| 129 | 3 | 2 | 2 | 1 | 3 | 10,775 | 10,032 | 40,303 | 38,124 | 21 | 19 | 119 | 115 |
| 130 | 3 | 2 | 2 | 1 | 4 | 12,120 | 11,341 | 45,738 | 42,953 | 21 | 19 | 120 | 111 |
| 131 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 5,759 | 5,349 | 21,315 | 20,423 | 28 | 26 | 136 | 135 |
| 132 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 6,045 | 5,659 | 22,515 | 21,108 | 26 | 24 | 130 | 128 |
| 133 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 7,109 | 6,467 | 26,772 | 24,761 | 27 | 24 | 131 | 128 |
| 134 | 3 | 2 | 2 | 2 | 4 | 8,670 | 7,893 | 33,132 | 30,462 | 30 | 27 | 139 | 135 |
| 135 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3,903 | 3,501 | 15,273 | 13,839 | 32 | 28 | 117 | 117 |
| 136 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4,272 | 4,141 | 16,523 | 15,798 | 29 | 28 | 132 | 138 |
| 137 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 5,077 | 5,043 | 19,751 | 19,804 | 31 | 31 | 152 | 159 |
| 138 | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 6,127 | 6,009 | 23,584 | 23,893 | 34 | 34 | 177 | 187 |
| 139 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 25,176 | 21,592 | 206,353 | 176,876 | 31 | 26 | 165 | 154 |
| 140 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 23,123 | 21,014 | 190,782 | 172,046 | 26 | 24 | 146 | 140 |
| 141 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 22,789 | 21,627 | 189,753 | 180,923 | 24 | 22 | 137 | 131 |
| 142 | 3 | 2 | 3 | 1 | 4 | 24,595 | 23,402 | 206,358 | 197,846 | 23 | 21 | 137 | 128 |
| 143 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 12,940 | 11,172 | 106,011 | 91,258 | 34 | 28 | 172 | 161 |
| 144 | 3 | 2 | 3 | 2 | 2 | 12,882 | 11,854 | 105,539 | 98,045 | 30 | 27 | 165 | 158 |
| 145 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 14,443 | 13,712 | 120,448 | 118,751 | 30 | 28 | 172 | 164 |
| 146 | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 17,372 | 16,541 | 149,436 | 148,973 | 32 | 30 | 187 | 176 |
| 147 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 | 8,382 | 7,206 | 70,347 | 63,203 | 36 | 30 | 146 | 138 |
| 148 | 3 | 2 | 3 | 3 | 2 | 9,518 | 8,275 | 79,254 | 70,957 | 36 | 30 | 161 | 158 |
| 149 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 11,094 | 10,026 | 97,407 | 91,784 | 37 | 32 | 175 | 184 |
| 150 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 13,128 | 12,234 | 118,616 | 113,967 | 40 | 36 | 199 | 206 |