

**DESEMPEÑO DE AISLADORES DE BASE EN TANQUES DE AGUA  
ELEVADOS SOMETIDOS A ACCIONES SÍSMICAS**

**ADRIANA MARCELA BAUTISTA RODRIGUEZ  
EFRAÍN HORACIO CARREÑO REMOLINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DESEMPEÑO DE AISLADORES DE BASE EN TANQUES DE AGUA  
ELEVADOS SOMETIDOS A ACCIONES SÍSMICAS**

**ADRIANA MARCELA BAUTISTA RODRIGUEZ  
EFRAÍN HORACIO CARREÑO REMOLINA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGERIERO CIVIL**

**DIRECTOR**

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO  
PHD. INGENIERÍA CIVIL**

**CODIRECTOR**

**JESÚS DANIEL VILLALBA MORALES  
PHD. INGENIERÍA CIVIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por permitirme llevar a cabo este proyecto y brindarme la sabiduría necesaria en cada proceso, por poner en mi vida las personas adecuadas para servirme de apoyo en todo momento, a mis padres, hermanos y demás familiares, amigos incondicionales, y docentes que con su dedicación me hicieron amar la profesión. Al profesor Oscar Begambre y Jesús Villalba que como personas ejemplares siempre estuvieron dispuestas a ayudarme y guiarme, para desarrollar este proyecto de la mejor manera.

**ADRIANA MARCELA BAUTISTA RODRIGUEZ**

Gracias a mis padres y familiares por su ayuda y apoyo, a los docentes que contribuyeron en mi proceso de formación, a mis compañeros por el apoyo en los momentos de estudio y gracias a Dios por permitirme alcanzar este logro.

**EFRAIN HORACIO CARREÑO REMOLINA**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS .....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2. MODELO DE INTERACCIÓN AGUA-ESTRUCTURA .....	18
3. SISTEMA DE AISLACIÓN SÍSMICA.....	21
3.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO .....	21
4. DESCRIPCIÓN DE LOS TANQUES DE AGUA.....	28
5. MODELADO DE LA ESTRUCTURA SIN AISLADORES .....	30
5.1 MÉTODO DE ANÁLISIS .....	31
6. MODELADO DE LA ESTRUCTURA CON AISLADORES .....	34
7. RESULTADOS.....	36
7.1 ESTRUCTURAS CON BASE FIJA .....	36
7.1.1 Desplazamientos horizontales .....	36
7.1.2 Fuerza cortante y momento flector .....	38
7.2 ESTRUCTURAS AISLADAS.....	39
7.2.1 Desplazamientos horizontales .....	39
7.2.2 Fuerza cortante y momento flector .....	40
7.2.3 Periodo fundamental de la estructura .....	41

7.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	42
8.	CONCLUSIONES .....	57
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
	BIBLIOGRAFÍA.....	59

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones de los tanques estudiados.....	29
Tabla 2. Características de los tanques y parámetros para modelo de interacción agua-estructura.....	30
Tabla 3. Parámetros para determinar el espectro elástico de diseño de la ciudad de Bucaramanga.....	31
Tabla 4. Sismos utilizados en el análisis de la estructura. ....	32
Tabla 5. Peso total de la estructura y fuerza axial máxima.....	34
Tabla 6. Características y propiedades del aislador. ....	35
Tabla 7. Resultados de desplazamientos horizontales obtenidos del análisis dinámico para tanques de base fija y derivas. ....	37
Tabla 8. Resultados de fuerza cortante máxima y momento flector máximo obtenidos del análisis dinámico para tanques de base fija .....	38
Tabla 9. Resultados de desplazamientos horizontales obtenidos del análisis dinámico para tanques de base aislada y derivas .....	39
Tabla 10. Resultados de fuerza cortante máxima y momento flector máximo obtenidos del análisis dinámico para tanques de base aislada. ....	41
Tabla 11. Periodos estructurales de los tanques con base fija y aislada. ....	42
Tabla 12. Comparación de la respuesta sísmica para los tanques analizados.....	43

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema dinámico equivalente para un tanque de agua .....	18
Figura 2. Tanque original .....	28
Figura 3. Verificación de primer requisito para el espectro de respuesta de uno de los acelerogramas empleados. ....	33
Figura 4. Verificación de segundo requisito para el promedio de los sismos empleados. ....	33
Figura 5. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 1 con base fija y aislada. ....	43
Figura 6. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 2 con base fija y aislada. ....	44
Figura 7. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 3 con base fija y aislada. ....	44
Figura 8. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 4 con base fija y aislada. ....	44
Figura 9. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 5 con base fija y aislada. ....	45
Figura 10. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 6 con base fija y aislada. ....	45
Figura 11. Comparación de las derivas para el tanque 1 con base fija y aislada. ..	46
Figura 12. Comparación de las derivas para el tanque 2 con base fija y aislada. ..	46
Figura 13. Comparación de las derivas para el tanque 3 con base fija y aislada. .	47

Figura 14.Comparación de las derivas para el tanque 4 con base fija y aislada. ..	47
Figura 15.Comparación de las derivas para el tanque 5 con base fija y aislada. ..	48
Figura 16.Comparación de las derivas para el tanque 6 con base fija y aislada. ..	48
Figura 17. Comparación de la fuerza cortante inducida por el sismo de Coalinga en el tanque 1. ....	49
Figura 18. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Coalinga en el tanque 1. ....	49
Figura 19.Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Duzce en el tanque 1. ....	50
Figura 20. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Duzce en el tanque 1. ....	50
Figura 21. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Helena en el tanque 1. ....	51
Figura 22. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Helena en el tanque 1. ....	51
Figura 23. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Loma Prieta en el tanque 1. ....	52
Figura 24. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Loma Prieta en el tanque 1. ....	52
Figura 25. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Mammoth en el tanque 1. ....	53

Figura 26. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Mammoth en el tanque 1. ....	53
Figura 27. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Mendocino en el tanque 1. ....	54
Figura 28. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Mendocino en el tanque 1. ....	54
Figura 29. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Montenegro en el tanque 1. ....	55
Figura 30. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Montenegro en el tanque 1. ....	55

## RESUMEN

**TÍTULO:** DESEMPEÑO DE AISLADORES DE BASE EN TANQUES DE AGUA ELEVADOS SOMETIDOS A ACCIONES SÍSMICAS.

**AUTORES:** ADRIANA MARCELA BAUTISTA RODRIGUEZ  
EFRAÍN HORACIO CARREÑO REMOLINA

**PALABRAS CLAVE:** TANQUE DE AGUA ELEVADO, ANÁLISIS CRONOLÓGICO HISTÓRICO, AISLAMIENTO SÍSMICO, AISLADOR ELASTOMÉRICO.

### DESCRIPCIÓN:

En esta investigación se compara el comportamiento sísmico de tanques de agua elevados (con diferentes relaciones de ancho/altura), antes y después de ser aislados sísmicamente en su base. El dispositivo de aislamiento corresponde a un aislador elastomérico compuesto por capas de acero y neopreno vulcanizadas, el cual fue diseñado de acuerdo a las solicitaciones encontradas en la estructura con base fija a partir de un análisis lineal cronológico, se trabajó con la familia de acelerogramas disponibles en el estudio de microzonificación sísmica de Bucaramanga, utilizando el software SAP2000 v.19.1.0. Se implementó el método de Housner para obtener una aproximación del modelo de interacción agua-estructura ya que se cuenta con un ajuste de este método en el reglamento ACI 350 y que puede implementarse al modelar en el software. Finalmente se obtuvo una reducción efectiva, con la implementación del aislador, para la respuesta sísmica de la estructura en términos de cortante basal y momento flector, de aproximadamente 70% y 90%, además de un considerable aumento en los desplazamientos horizontales de la estructura, sin embargo esto es un comportamiento esperado debido a la implementación del aislador. En términos de relación ancho/altura, se encontró que las características geométricas del tanque afectan el comportamiento sísmico y el desempeño del aislador.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo

## ABSTRACT

**TITLE:** PERFORMANCE OF BASE ISOLATORS IN ELEVATED WATER TANKS  
SUBJECTED TO SEISMIC ACTIONS.

**AUTHORS:** ADRIANA MARCELA BAUTISTA RODRIGUEZ  
EFRAÍN HORACIO CARREÑO REMOLINA

**KEYWORDS:** ELEVATED WATER STORAGE TANK, TIME HISTORY ANALYSIS, SEISMIC  
ISOLATION, RUBBER ISOLATOR.

### DESCRIPTION:

In this research is compared the seismic response of elevated water storage tanks (with different width/height ratios), before and after being seismic isolated on their base. The isolation device, corresponds to a rubber isolator made-up with vulcanized steel and neoprene layers, which was designed according to the requests found on the fixed base structure from a linear time history analysis, working with the accelerograms family available in the seismic microzoning study of Bucaramanga, applying the SAP2000 v.19.1.0 software. The Housner method was implemented to obtain an approximation of the modeling of the water-structure interaction because it has an adjustment in the ACI 350 norm and is available for its application in the used software. Finally, an effective reduction for the seismic response of the structure was obtained in terms of base shear and bending moment, approximately of 70% and 90%, also an appreciable rise for the horizontal displacement was obtained, however it is an expected behavior for the isolator application. In terms of width/height ratios, it was found that the geometric characteristics of the tank affect the seismic behavior and the performance of the isolator.

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años el tema de protección sísmica ha ido ganando aceptación, y se ha incrementado la implementación de diferentes tecnologías, entre las que se encuentran los sistemas de aislación sísmica, principalmente en estructuras cuya función es de gran importancia en la sociedad, y se deben mantener durante y después de un evento sísmico. Los tanques de agua, almacenan un recurso vital, y deben mantener el suministro de agua ante cualquier eventualidad, por tanto, su aislamiento sísmico podría conservar la estructura y su funcionalidad en caso de emergencia, aportando sin duda un beneficio en tal situación.

En países como Chile que han sido afectados por eventos sísmicos de gran magnitud se han realizado estudios para la protección de tanques de agua, tanto elevados como enterrados. Estudios de tanques de agua elevados han concluido que se logra disminuir la fuerza cortante y el momento flector inducidos a la estructura por las fuerzas sísmicas en un 50% luego de ser aislados, aun obteniendo un aumento en la magnitud del desplazamiento horizontal [1]. Sin embargo, pese a sucesos sísmicos ocurridos en la historia de Colombia, y a que es un país cuya mayor parte de la población está ubicada en zonas de amenaza sísmica alta, este no se encuentra a la vanguardia en la implementación de aisladores sísmicos para estructuras, siendo escasas las construcciones que cuentan con estos, de las cuales dos corresponden a puentes y otras pocas a hospitales y edificaciones en las ciudades de Cali, Manizales y Pereira [2]. La ciudad de Bucaramanga que se encuentra localizada en zona de alta sismicidad, no dispone de ninguna estructura que implemente este sistema de aislación sísmica.

Teniendo en cuenta esto, se realizó este proyecto de investigación, con el fin de estudiar la implementación de aisladores sísmicos en tanques de agua ubicados en zona de amenaza sísmica alta, comparando el comportamiento de estos, antes y después de ser aislados sísmicamente. Se determinó la relación paramétrica que

muestra mejor respuesta, analizando 12 tanques de agua (6 aislados y 6 no aislados) con diferentes características físicas.

El estudio se desarrolló en 4 capítulos que comprenden la definición del sistema de interacción agua-estructura, el modelamiento de los tanques de base fija en el software SAP2000 suministrado por el grupo INME-UIS, el diseño del aislador según las solicitaciones encontradas y el modelamiento de los tanques con base aislada en el mismo software.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Comparar la respuesta sísmica de tanques de agua elevados con y sin aisladores sísmicos de base, construido en una zona de amenaza sísmica alta.

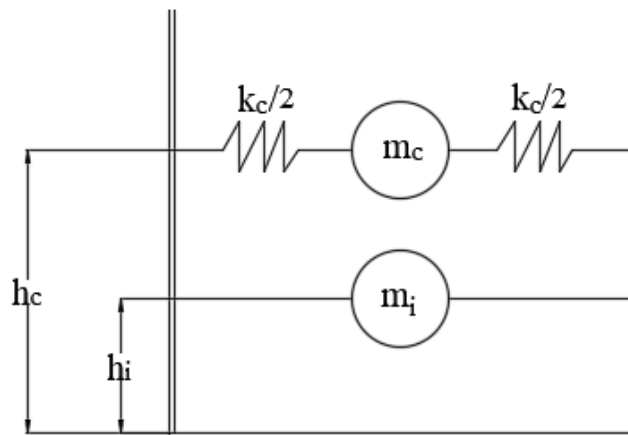
### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar un modelo de interacción agua-estructura que permita el análisis de la respuesta sísmica de los tanques a partir de la literatura científica.
- Identificar las relaciones paramétricas que mayor influencia ejercen en la respuesta sísmica de los tanques a partir de un análisis de sensibilidad a las propiedades físicas de la estructura.
- Determinar la eficiencia de la implementación de los aisladores a partir de las diferencias encontradas en las magnitudes de cortante basal, momento flector y desplazamiento horizontal, en un tanque de agua aislado respecto un tanque de agua con base fija.

## 2. MODELO DE INTERACCIÓN AGUA-ESTRUCTURA

El modelo de Housner [3] simplifica el análisis dinámico de un tanque de agua. Éste modelo establece que el agua contenida dentro de un tanque se puede dividir en dos masas equivalentes según su comportamiento durante el evento sísmico; una masa impulsiva ( $m_i$ ) que tiene el mismo comportamiento del tanque, y se idealiza unida de forma rígida a las paredes de este, y una masa convectiva ( $m_c$ ) que simula el comportamiento de oleaje del agua, idealizándose como masa oscilante conectada mediante resortes al tanque, la Figura 1 muestra este sistema equivalente.

Figura 1. Sistema dinámico equivalente para un tanque de agua



Para determinar los parámetros requeridos en el análisis dinámico de los tanques fueron utilizadas las siguientes ecuaciones basadas en el modelo de Housner y planteadas en el capítulo 9 de la norma ACI 350.3-01.

El peso equivalente para cada una de las masas corresponde:

$$\frac{W_i}{W_L} = \frac{\tanh[0.866(L/H_L)]}{0.866(L/H_L)} \quad (1)$$

$$\frac{W_c}{W_L} = 0.264(L/H_L)\tanh[3.16(H_L/L)] \quad (2)$$

Donde:

$H_L$  = Altura de diseño del líquido almacenado, m

$L$  = Longitud interior del tanque, paralela a la dirección de la fuerza del terremoto, m

$W_c$  = Peso equivalente del componente convectivo del líquido almacenado, KN

$W_i$  = Peso equivalente del componente impulsivo del líquido almacenado, KN

$W_L$  = Peso total del líquido almacenado, KN

Las alturas para la masa impulsiva se determinan de acuerdo a la condición:

Tanques con  $\frac{L}{H_L} < 1.33$

$$\frac{h_i}{H_L} = 0.5 - 0.09375 \left( \frac{L}{H_L} \right) \quad (3)$$

Tanques con  $\frac{L}{H_L} > 1.333$

$$\frac{h_i}{H_L} = 0.375 \quad (4)$$

Para todos los tanques la altura de la masa convectiva es:

$$\frac{h_c}{H_L} = 1 - \frac{\cosh[3.16(L/H_L)] - 1}{3.16(H_L/L) \sinh[3.16(H_L/L)]} \quad (5)$$

Donde:

$h_c$  = Altura sobre la base de la pared al centro de gravedad de la fuerza lateral convectiva, m

$h_i$  = Altura sobre la base de la pared al centro de gravedad de la fuerza lateral impulsiva, m

Finalmente para hallar la constante de rigidez de la masa convectiva se tiene:

$$k_c = 4\pi^2 \frac{m_c}{T_c} \quad (6)$$

Con

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c} \quad (7)$$

$$\omega_c = \frac{\lambda}{\sqrt{L}} \quad (8)$$

$$\lambda = \sqrt{3.16g \tanh[3.16(H_L/L)]} \quad (9)$$

Donde:

$k_c$  = Constante de rigidez del resorte para la masa convectiva, KN/m

$m_c$  = Masa convectiva de líquido contenido en el tanque, Ton

$T_c$  = Período natural del primer modo (convectivo) de chapoteo, s

$\omega_c$  = Frecuencia circular de oscilación del primer modo (convectivo) de chapoteo, rad/s

### 3. SISTEMA DE AISLACIÓN SÍSMICA

Aislar sísmicamente una estructura, refiere a incorporar mecanismos de soporte que desacoplan la estructura de sus fundaciones, haciendo que la interacción suelo-estructura deje de existir de una forma directa, beneficiando su comportamiento ante eventos sísmicos [4].

Existen diferentes sistemas de control pasivo para reducir el riesgo sísmico en una estructura. Los aisladores de base hacen parte del sistema pasivo de protección sísmica y pueden ser de tipo flexible o deslizante. Los de tipo flexible, estudiados en la presente investigación, son apoyos elastoméricos conformados por láminas de acero y neopreno vulcanizadas, los cuales permiten que la estructura tenga mayor flexibilidad ante desplazamientos horizontales y amortiguación de energía. Algunos de estos aisladores llevan aditivos que aumentan la capacidad de amortiguamiento del material, o bien se les incorpora un núcleo de plomo que brinda una disipación adicional de energía [5].

#### 3.1 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para el diseño de los aisladores se siguieron las recomendaciones descritas en el capítulo 17 del ASCE/SEI 7-16. A continuación se presenta el procedimiento de diseño de los aisladores de alto amortiguamiento (HDBR), que corresponde al tipo de dispositivo considerado en esta investigación, con base en lo desarrollado por Manrique y Meza [6] y propuesto por Arriagada [7].

Para llevar a cabo el proceso de diseño se debe previamente:

- Fijar los límites de deformación de corte directa máxima  $\gamma_s$  y de la deformación de corte máxima admisible  $\gamma_{m\acute{a}x}$ .

- Establecer un valor de amortiguamiento  $\beta_M$  y determinar de acuerdo con la tabla 17.5-1 del ASCE/SEI 7-16 el factor de amortiguamiento del sistema  $B_M$ .
- Calcular el desplazamiento máximo  $D_M$  de acuerdo a la ecuación 17.5-1 del ASCE/SEI 7-16.
- Definir la tensión admisible de compresión  $\sigma_{AC}$ .

Así, de manera iterativa se siguen los siguientes pasos, hasta cumplir con todos los chequeos descritos:

**Paso 1:** Calcular la rigidez horizontal total del sistema de aislación a partir de la ecuación 17.5-2 del ASCE/SEI 7-16, y luego de manera independiente para cada aislador.

$$k_{HTotal} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} \quad (10)$$

$$k_H = \frac{k_{HTotal}}{N} \quad (11)$$

Donde:

$W$  = Peso total de la estructura, KN

$T_D$  = Periodo de diseño de la estructura, s

$g$  = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>

**Paso 2:** Determinar el área requerida del aislador a partir de la tensión admisible a compresión y la fuerza axial máxima, y con esta hallar el diámetro requerido del dispositivo

$$A = \frac{P_{m\acute{a}x}}{\sigma_{AC}} \quad (12)$$

**Paso 3:** Calcular la altura total de la goma  $H_r$  de acuerdo a la relación de desplazamiento de máximo y la deformación lateral por corte

$$H_r = \frac{D_M}{\gamma_s} \quad (13)$$

**Paso 4:** Calcular el valor del módulo de corte  $G$  de la goma.

$$G = \frac{k_H H_r}{A} \quad (14)$$

**Paso 5:** Asumir un espesor para las capas de goma  $t_r$ . Se recomienda iniciar con 6 mm, y si es necesario variarlo de acuerdo al control que se recomienda en el paso 6 para obtener una adecuada rigidez vertical del aislador.

**Paso 6:** Calcular el factor de forma  $S$  para medir el tamaño relativo de una lámina de goma.

$$S = \frac{D_e - D_i}{4t_r} \quad (15)$$

$$S > 10$$

Donde:

$D_e$  = Diámetro exterior del aislador

$D_i$  = Diámetro interior del aislador

Con este primer chequeo se asegura un valor adecuado para la rigidez vertical.

**Paso 7:** Determinar el número de capas de goma de acuerdo a la relación de espesor total de la goma y espesor de la capa de goma.

$$n = \frac{H_r}{t_r} \quad (16)$$

**Paso 8:** Asumir un valor de espesor para las placas de acero  $t_s$ , se recomienda un espesor mínimo de 3 mm y calcular la tensión máxima en las placas de acero para comprobar que esta sea menor a la admisible.

$$\sigma_s = 1.5 \frac{t_r}{t_s} \sigma_{AC} \quad (17)$$

$$\sigma_{adm} = 0.75 \sigma_y \quad (18)$$

$$\sigma_s \leq \sigma_{adm}$$

**Paso 9:** Calcular la altura total del aislador  $H$  teniendo en cuenta las capas de goma, el espesor de las placas de acero y de las placas superior e inferior  $t_{ext}$  entre las cuales se instalará el aislador.

$$h = H_r + (n - 1)t_s \quad (19)$$

$$H = h + 2t_{ext} \quad (20)$$

**Paso 10:** Calcular la rigidez y frecuencia vertical. La primera depende del módulo de compresión para el conjunto acero-goma, y se calcula con la ecuación que se muestra a continuación, con base en la norma chilena NCh 2745.

$$k_v = \frac{AE_c}{H_r} \quad (21)$$

$$\frac{1}{E_c} = \left( \frac{1}{4GS^2} + \frac{4}{3K} \right) \quad (22)$$

Donde  $K$  corresponde al módulo de compresibilidad de la goma y su valor es de 2000 kg/cm<sup>2</sup>.

$$f_v = \sqrt{6 \cdot S \cdot f_H} \quad (23)$$

$$f_v \geq 10 \text{ Hz}$$

Con este chequeo se asegura que la rigidez vertical sea la mínima para reducir las amplificaciones de las aceleraciones y las deformaciones verticales.

**Paso 11:** Calcular el periodo de diseño de acuerdo los valores obtenidos en pasos anteriores a partir de la ecuación 17.5-2 del ASCE/SEI 7-16 y el cálculo de la rigidez como se muestra.

$$k_H = \frac{G \cdot A}{H_r} \quad (24)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_H g}} \quad (25)$$

Se debe verificar que este periodo calculado no se aleje del valor asumido para diseñar.

**Paso 12:** Calcular la deformación angular máxima, como la suma de las deformaciones angulares asociadas a corte y compresión del aislador, el efecto de la flexión se desprecia debido a su poca influencia en comparación con las otras.

$$\gamma_{m\acute{a}x} \approx \gamma_s + \gamma_c \quad (26)$$

$$\gamma_s = \frac{D_M}{H_r} \quad (27)$$

$$\gamma_c = 6 \cdot S \cdot \varepsilon_c \quad (28)$$

$$\varepsilon_c = \frac{P_{m\acute{a}x}/A}{E_0(1 + 2kS^2)} \quad (29)$$

Donde  $E_0$  es un valor suministrado por el fabricante del dispositivo y el valor de  $k$  se encuentra entre 0.7 y 1.

$$\gamma_{m\acute{a}x\text{acceptable}} = \frac{0.85\varepsilon_b}{F.S} \quad (30)$$

Donde  $\varepsilon_b$  se considera generalmente 5.5 y el factor de seguridad mayor a 1.5.

$$\gamma_{m\acute{a}x} \leq \gamma_{m\acute{a}x\text{acceptable}}$$

Se chequea con el fin de asegurar que el aislador soporte un sismo de gran magnitud.

**Paso 13:** Calcular la carga crítica de pandeo para verificar el pandeo producido por flexión ante la combinación de corte y compresión.

$$P_{crit} = \frac{P_s}{2} \left( \sqrt{1 + 4 \frac{P_E}{P_s}} - 1 \right) \quad (31)$$

Donde  $P_s$  es una rigidez de corte efectiva y  $A_s$  es un área de corte efectiva

$$P_s = G \cdot A_s \quad (32)$$

$$A_s = A \frac{h}{H_r} \quad (33)$$

$$P_E = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{h^2} \quad (34)$$

Donde

$$(EI)_{eff} = \frac{1}{3} E_c I \quad (35)$$

$$I = \frac{\pi}{4} \left[ \left( \frac{D_e}{2} \right)^4 - \left( \frac{D_i}{2} \right)^4 \right] \quad (36)$$

Así, se chequea finalmente que:

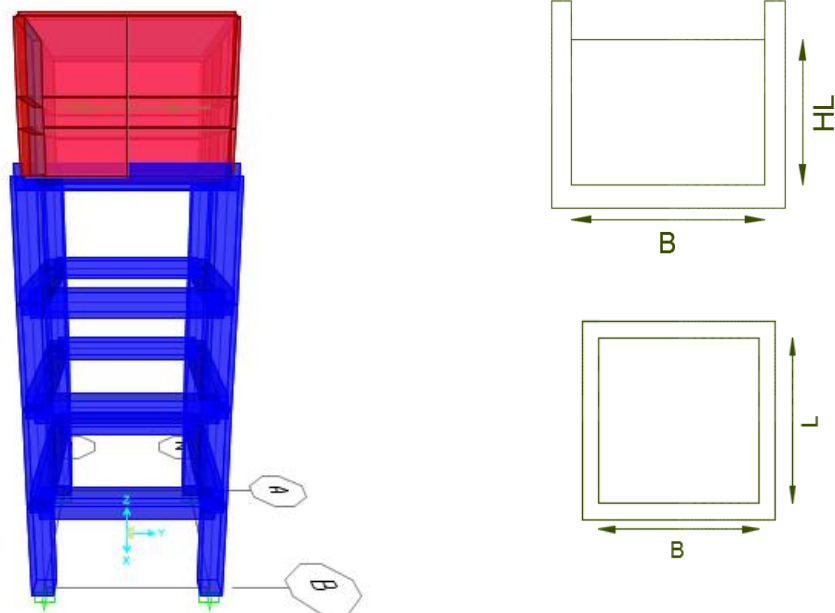
$$\frac{P_{crit}}{P_{máx}} \geq F.S \approx 2$$

No se hace verificación de volcamiento ya que se diseña el aislador con conexión por pernos, lo que resta importancia a este efecto.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LOS TANQUES DE AGUA

La estructura estudiada corresponde a un tanque de agua elevado en concreto armado, compuesto por una base tipo pórtico con columnas de dimensiones 65x65 cm y vigas de 60x65 cm, sobre la cual se apoya el tanque de sección transversal cuadrada (Figura 2). La estructura cuenta con 4 niveles, el primero a una altura de 2,9 m, el segundo de 5,85 m, el tercero de 8,8 m y el cuarto de 11,975 m. Para el análisis, se estudian seis tanques con diferentes características geométricas, partiendo de un diseño real (Tanque 1); que hace parte de un sistema de abastecimiento de agua potable, suministrado por el AMB (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga).

Figura 2. Tanque original



Se mantuvo constante el volumen del tanque original, modificando sólo dimensiones de ancho y altura, obteniendo seis estructuras diferentes, descritas en La Tabla 1. Además se determinó la relación ancho/altura para cada tanque, con el fin de identificar la relación con la que se obtiene un mejor desempeño del aislador.

Tabla 1. Dimensiones de los tanques estudiados

	<b>Tanque 1</b>	<b>Tanque 2</b>	<b>Tanque 3</b>	<b>Tanque 4</b>	<b>Tanque 5</b>	<b>Tanque 6</b>
<b>HL [m]</b>	3,00	2,40	2,10	3,70	4,10	4,70
<b>L [m]</b>	5,00	5,60	6,00	4,50	4,30	4,00
<b>B [m]</b>	5,00	5,60	6,00	4,50	4,30	4,00
<b>B/HL</b>	1,67	2,33	2,86	1,22	1,05	0,85

## 5. MODELADO DE LA ESTRUCTURA SIN AISLADORES

Para hacer el modelado de los tanques en SAP2000, la masa convectiva fue representada en un nodo con un peso  $W_c$  ubicada en el centro del tanque a una altura  $h_c$  medida desde la base de éste, unida con un elemento de enlace "link" con propiedades lineales  $k$ , para representar la rigidez en la dirección horizontal; y la masa impulsiva fue representada en un nodo con un peso  $W_i$  también ubicada en el centro del tanque a una altura  $h_i$  medida desde la base de éste, y su rigidez se determinó con la asignación de un diafragma rígido. Los resultados obtenidos para cada uno de los tanques se presentan en la Tabla 2.

En la Tabla 2 se pueden observar dos valores de rigidez, donde  $k_c$  corresponde al valor utilizado en el software, calculado de acuerdo al reglamento ACI350.3-01, y  $k$  es verificada y determinada de acuerdo a la ecuación original planteada por Housner.

Tabla 2. Características de los tanques y parámetros para modelo de interacción agua-estructura

	Unidad	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4	Tanque 5	Tanque 6
<b>M<sub>L</sub></b>	Kg	75000	75264	75600	74925	75809	75200
<b>W<sub>L</sub></b>	KN	735,75	738,34	741,64	735,01	743,69	737,71
<b>W<sub>i</sub></b>	KN	455,91	352,77	295,51	546,47	589,78	627,93
<b>W<sub>c</sub></b>	KN	309,45	397,99	449	233,4	204,92	165,55
<b>h<sub>i</sub></b>	m	1,13	0,9	0,79	1,43	1,65	1,98
<b>h<sub>c</sub></b>	m	1,83	1,36	1,15	2,47	2,87	3,49
<b>k</b>	KN/m	187,42	197,02	190,29	162,5	150,24	130,96
<b>λ</b>	m <sup>1/2</sup> /s	5,44	5,21	4,99	5,54	5,55	5,56
<b>T<sub>c</sub></b>	s	2,58	2,85	3,09	2,41	2,35	2,26
<b>k<sub>c</sub></b>	KN/m	186,95	196,52	189,81	162,09	149,87	130,63

## 5.1 MÉTODO DE ANÁLISIS

El método de análisis dinámico utilizado fue cronológico lineal. Para su procedimiento debe utilizarse una familia de acelerogramas, que en esta investigación corresponden a los indicados en la microzonificación sísmica de Bucaramanga. De acuerdo como se indica en el NSR-10 los acelerogramas empleados fueron ajustados utilizando el software SeismoMatch 2016 [8], el cual realiza un ajuste espectral con base en el espectro de diseño introducido, de acuerdo a lo planteado en el mismo reglamento, con los parámetros correspondientes a la ciudad de Bucaramanga (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros para determinar el espectro elástico de diseño de la ciudad de Bucaramanga.

<b>Aa</b>	<b>Av</b>	<b>Fa</b>	<b>Fv</b>	<b>I</b>	<b>Tc</b>	<b>To</b>	<b>T<sub>L</sub></b>
0,25	0,25	1,15	1,55	1,5	0,65	0,13	3,72

Así mismo, de acuerdo a A.2.7.1 (c) del NSR-10 se chequearon los acelerogramas ajustados por el software para verificar que:

- Individualmente ningún acelerograma ajustado tuviera ordenadas espectrales menores que el 80% de las ordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno, en un rango comprendido entre  $0.8T$  y  $1.2T$ , donde  $T$  es el periodo de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura.
- El promedio de las ordenadas espectrales de los registros utilizados no fuera menor que las ordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno, en un rango comprendido entre  $0.2T$  y  $1.5T$ .

La estructura cuenta con periodos fundamentales entre 0,43 s y 0,47 s para los seis tanques, al verificar en los rangos establecidos, tres de los sismos estudiados no cumplieron con estos criterios, por lo que se trabaja con los siete registros restantes que en conjunto satisfacen aproximadamente estas condiciones (Figura 3 y 4). La Tabla 4 registra los sismos que se introdujeron en los diferentes modelos estructurales.

Tabla 4. Sismos utilizados en el análisis de la estructura.

<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Nombre del sismo</b>	<b>Estación</b>	<b>Código</b>
31/10/1935	18:37:49	Helena	Carr. Coll	Helena
27/05/1980	14:50:57	Mam Lak (As)	Long Val.D	Mammoth
22/07/1983	2:39:54	Coalinga (As)	Oil Fie	Coalinga
15/04/1979	6:19:41	Montenegro	Herceg Nov.	Montenegro
18/10/1989	0:04:02	Loma Prieta	Gilroy 1	Loma Prieta
25/04/1992	18:06:04	C. Mendocino	Butler Val. 2	Mendocino
12/11/1999	16:57:20	Duzce	Mud-Kaym. Bin	Duzce

Como se observa en la Figura 4, el promedio de las ordenadas espectrales de los sismos seleccionados (Tabla 4) no cumple el criterio, sin embargo la disposición de información y registros sísmicos para estudiar es escasa, y este tema de selección de acelerogramas implica estudio e investigación propia, por lo que se decidió realizar el estudio con la información disponible.

Figura 3. Verificación de primer requisito para el espectro de respuesta de uno de los acelerogramas empleados.

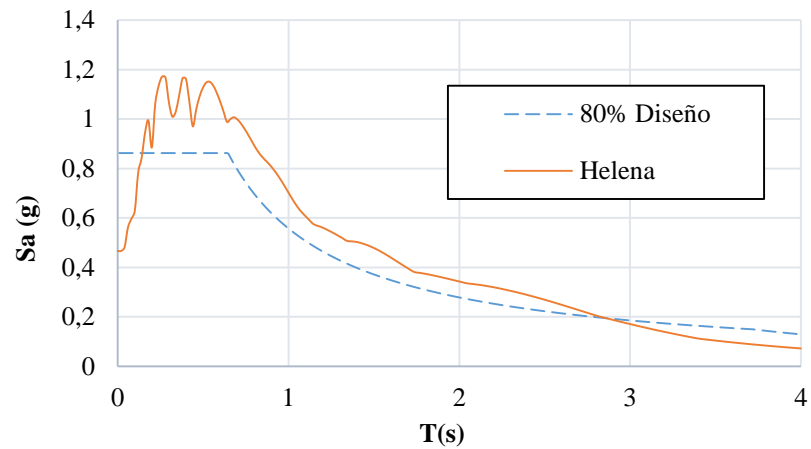
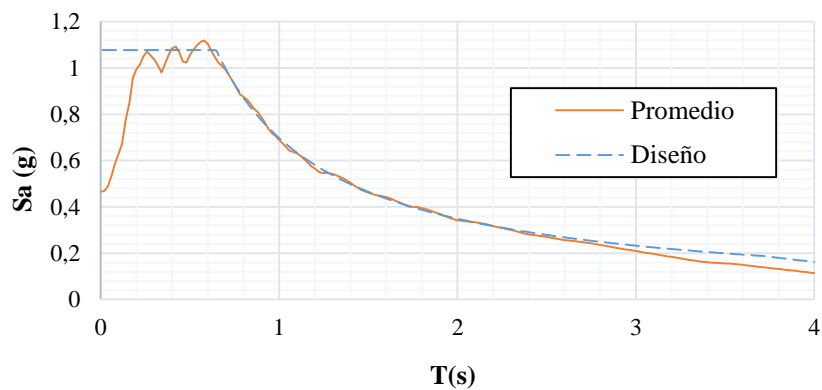


Figura 4. Verificación de segundo requisito para el promedio de los sismos empleados.



Los siete casos de sismos (Tabla 4) fueron ingresados al programa SAP2000 teniendo en cuenta los efectos ortogonales indicados en A.3.6.3 del NSR-10, suponiendo la ocurrencia simultánea del 100% de las fuerzas sísmicas en una dirección y el 30% de las fuerzas sísmicas en la dirección perpendicular.

## 6. MODELADO DE LA ESTRUCTURA CON AISLADORES

El diseño de los aisladores depende de la fuerza axial en las columnas de apoyo del tanque encontradas en el análisis dinámico ya desarrollado anteriormente para la estructura con base fija. Los resultados fueron obtenidos utilizando la combinación de peso propio y sismo (1.2D + 1.0E) para la que se obtiene la máxima respuesta (Tabla 5). De acuerdo al método de análisis utilizado y lo indicado en A.2.7.1 (a) del NSR-10,  $P_{\text{máx}}$  se determina con el promedio del valor máximo obtenido en cada uno de los casos de sismos.

Tabla 5. Peso total de la estructura y fuerza axial máxima

Tanque	W [KN]	$P_{\text{máx}}$ [KN]
1	2713,820	5089,596
2	2734,360	4786,702
3	2760,776	4611,926
4	2713,926	5330,962
5	2732,745	5637,177
6	2731,740	5612,476

Se utilizaron 4 aisladores, ubicados en cada una de las columnas que forman parte de la estructura. Para los seis tanques se tiene los siguientes datos de entrada en común:

- Amortiguamiento efectivo,  $\beta_M = 15\%$
- Factor de amortiguamiento,  $B_M = 1.35$
- Aceleración espectral a 1 segundo con amortiguamiento del 5%,  $S_{M1} = 0,698$
- Periodo de diseño,  $T_D = 2,5$  seg
- Deformación de corte directa máxima  $\gamma_s = 150\%$

- Deformación de corte máxima admisible  $\gamma_{m\acute{a}x} = 250 \%$
- Tensión admisible de compresión,  $\sigma_{AC} = 90 \text{ Kg/cm}^2$
- Esfuerzo de fluencia en las láminas de acero,  $\sigma_y = 2400 \text{ Kg/cm}^2$

Siguiendo el procedimiento de diseño mostrado anteriormente en 3.1, con las iteraciones adecuadas se obtuvieron las características y propiedades presentadas en la Tabla 4, para el aislador en cada uno de los tanques. Además se tiene en común:

- $n = 36$
- $t_r = 6 \text{ mm}$
- $t_s = 3 \text{ mm}$
- $t_{ext} = 3,8 \text{ cm}$
- $H = 39,7 \text{ cm}$

Para el modelado de los tanques con aisladores en el programa SAP2000, se utilizó el mismo procedimiento y método de análisis mostrado en el capítulo 5; cambiando únicamente los apoyos de la estructura. Los aisladores fueron modelados por elementos link de tipo “rubber isolator”. Los parámetros que los describen son la rigidez vertical representada en la dirección U1 y la rigidez horizontal representada en las direcciones U2 y U3, correspondientes a los valores  $k_v$  y  $k_H$  mostrados en la Tabla 6, respectivamente.

Tabla 6. Características y propiedades del aislador.

	Unidad	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 4	Tanque 5	Tanque 6
<b><math>k_{HTotal}</math></b>	KN/m	1747,4	1760,62	1777,63	1747,47	1759,58	1758,94
<b><math>k_H</math></b>	KN/m	436,85	440,16	444,41	436,87	439,9	439,73
<b><math>D_i</math></b>	m	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
<b><math>D_e</math></b>	m	0,9	0,9	0,85	0,95	0,95	0,95
<b><math>K_v</math></b>	KN/m	$1,875 \times 10^6$	$1,827 \times 10^6$	$1,698 \times 10^6$	$2,03 \times 10^7$	$2,093 \times 10^6$	$2,089 \times 10^6$

## 7. RESULTADOS

Los resultados fueron obtenidos de los modelos realizados en SAP2000, evaluando el promedio de los valores máximos en cada uno de los sismos individuales, de acuerdo a lo especificado en A.2.7.1 (a) del NSR-10, ya que el estudio se efectuó implementando una familia de 7 acelerogramas. Las respuestas que se compararon, para determinar la eficiencia en la implementación de los aisladores, fueron los desplazamientos horizontales y derivas, las fuerzas cortantes y los momentos de flexión.

### 7.1 ESTRUCTURAS CON BASE FIJA

#### 7.1.1 Desplazamientos horizontales

Se obtuvo un registro cronológico de los desplazamientos horizontales de la estructura, identificando el instante de tiempo en el que ocurre el máximo desplazamiento del último nivel del tanque, referente a la tapa, y tomando los valores de desplazamiento correspondientes a ese instante. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7, junto con el cálculo de derivas en las estructuras dado por (37), que permite además realizar el chequeo indicado en el capítulo A.6 del NSR-10, con el fin de garantizar el adecuado comportamiento de la estructura y el cumplimiento del reglamento.

$$\Delta_i = \delta_i - \delta_{i-1} \quad (37)$$

Donde:

$\Delta$  = Deriva de piso

$\delta$  = Desplazamiento horizontal

Tabla 7. Resultados de desplazamientos horizontales obtenidos del análisis dinámico para tanques de base fija y derivas.

Tanque	Piso	Sismo							Promedio	Deriva
		Coalinga	Duzce	Helena	Loma Prieta	Mammoth	Montenegro	Mendocino		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0,015	0,018	0,013	0,015	0,014	0,015	0,021	0,016	0,016
	2	0,042	0,048	0,036	0,041	0,038	0,042	0,057	0,043	0,028
	3	0,071	0,078	0,058	0,068	0,062	0,069	0,093	0,071	0,028
	4	0,096	0,102	0,076	0,090	0,082	0,091	0,123	0,094	0,023
	5	0,099	0,104	0,077	0,092	0,084	0,093	0,126	0,096	0,002
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0,015	0,017	0,014	0,011	0,013	0,015	0,018	0,015	0,015
	2	0,042	0,047	0,037	0,03	0,034	0,04	0,049	0,04	0,025
	3	0,071	0,076	0,059	0,05	0,056	0,065	0,08	0,065	0,026
	4	0,096	0,1	0,078	0,067	0,074	0,085	0,105	0,086	0,021
	5	0,098	0,102	0,079	0,068	0,075	0,086	0,107	0,088	0,002
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0,015	0,017	0,014	0,011	0,013	0,013	0,017	0,014	0,014
	2	0,041	0,045	0,037	0,03	0,034	0,036	0,045	0,038	0,024
	3	0,07	0,072	0,06	0,052	0,056	0,058	0,073	0,063	0,025
	4	0,094	0,094	0,079	0,069	0,073	0,076	0,095	0,083	0,02
	5	0,096	0,096	0,08	0,071	0,074	0,078	0,097	0,084	0,001
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0,015	0,018	0,012	0,013	0,013	0,016	0,025	0,016	0,016
	2	0,042	0,049	0,033	0,036	0,035	0,043	0,069	0,044	0,028
	3	0,07	0,081	0,055	0,06	0,057	0,069	0,112	0,072	0,028
	4	0,094	0,108	0,073	0,08	0,076	0,092	0,149	0,096	0,024
	5	0,097	0,111	0,075	0,082	0,078	0,094	0,153	0,099	0,003
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0,016	0,021	0,014	0,012	0,01	0,023	0,023	0,017	0,017
	2	0,043	0,058	0,037	0,032	0,028	0,062	0,063	0,046	0,029
	3	0,07	0,095	0,06	0,053	0,045	0,103	0,104	0,076	0,03
	4	0,094	0,127	0,08	0,073	0,061	0,139	0,14	0,102	0,026
	5	0,098	0,134	0,084	0,076	0,064	0,146	0,147	0,107	0,005

Los datos registrados en la Tabla 7 están en unidades de metros [m].

Tabla 7. (Continuación)

Tanque	Piso	Sismo							Promedio	Deriva
		Coalinga	Duzce	Helena	Loma Prieta	Mammoth	Montenegro	Mendocino		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0,015	0,021	0,013	0,012	0,01	0,021	0,023	0,017	0,017
	2	0,041	0,057	0,036	0,033	0,028	0,058	0,063	0,045	0,029
	3	0,069	0,094	0,059	0,054	0,047	0,094	0,104	0,074	0,029
	4	0,093	0,125	0,079	0,072	0,062	0,125	0,139	0,099	0,025
	5	0,097	0,13	0,082	0,074	0,065	0,129	0,144	0,103	0,004

### 7.1.2 Fuerza cortante y momento flector

Se obtuvieron los resultados de cortante basal y momento flector inducidos en la estructura, debido a las acciones sísmicas para cada instante de tiempo. Se identificaron los valores máximos de cada registro que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de fuerza cortante máxima y momento flector máximo obtenidos del análisis dinámico para tanques de base fija

Tanque	Parámetro	Sismo							Promedio
		Coalinga	Duzce	Helena	Loma Prieta	Mammoth	Montenegro	Mendocino	
1	V	4115	2467	2978	3958	3120	3478	4710	3547
	M	43860	30250	34204	41351	36730	41200	54704	40328
2	V	4080	3906	3053	2830	2873	4088	3347	3454
	M	43200	44950	34920	30316	33140	47080	38127	38819
3	V	4119	3784	3078	2888	2852	3028	3755	3358
	M	12722	12619	10535	9327	9796	10188	12749	11134
4	V	4128	4088	2785	2892	2848	3578	5688	3715
	M	43081	49290	33041	34019	34457	41965	67947	43400
5	V	3590	4776	3050	2943	2325	4712	5254	3807
	M	42368	57787	36294	33006	27508	57045	63533	45363
6	V	3541	4717	2991	2871	2363	4465	5252	3743
	M	43461	58052	36626	33471	28295	54951	64439	45614

Los valores de fuerza cortante (V) están dados en kN y los momentos flectores (M) de la Tabla 8 están dados en kN-m.

## 7.2 ESTRUCTURAS AISLADAS

### 7.2.1 Desplazamientos horizontales

De la misma manera que para la estructura de base fija, se obtuvo el registro para cada instante de tiempo de los valores de desplazamiento horizontal, mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de desplazamientos horizontales obtenidos del análisis dinámico para tanques de base aislada y derivas

Tanque	Piso	Sismo							Promedio	Deriva
		Coalinga	Duzce	Helena	Loma Prieta	Mammoth	Montenegro	Mendocino		
1	0	0,612	0,577	0,505	0,401	0,377	0,48	0,586	0,505	0
	1	0,629	0,593	0,518	0,412	0,387	0,493	0,602	0,519	0,014
	2	0,639	0,602	0,527	0,418	0,394	0,501	0,612	0,528	0,009
	3	0,647	0,61	0,533	0,423	0,399	0,507	0,619	0,534	0,007
	4	0,654	0,615	0,538	0,427	0,403	0,512	0,625	0,539	0,005
	5	0,655	0,616	0,539	0,428	0,403	0,513	0,626	0,54	8E-04
2	0	0,641	0,597	0,504	0,587	0,376	0,431	0,584	0,531	0
	1	0,658	0,614	0,518	0,603	0,387	0,442	0,6	0,546	0,015
	2	0,669	0,624	0,526	0,613	0,393	0,45	0,61	0,555	0,009
	3	0,677	0,631	0,533	0,62	0,398	0,455	0,618	0,562	0,007
	4	0,684	0,637	0,538	0,626	0,402	0,459	0,623	0,567	0,005
	5	0,684	0,638	0,538	0,627	0,402	0,46	0,624	0,568	6E-04
3	0	0,631	0,613	0,508	0,626	0,381	0,407	0,575	0,534	0
	1	0,648	0,63	0,521	0,643	0,392	0,419	0,591	0,549	0,015
	2	0,659	0,641	0,53	0,654	0,398	0,426	0,6	0,558	0,009
	3	0,667	0,649	0,537	0,662	0,403	0,431	0,608	0,565	0,007
	4	0,673	0,655	0,541	0,668	0,407	0,435	0,614	0,571	0,005
	5	0,674	0,655	0,542	0,669	0,408	0,436	0,614	0,571	6E-04

Tabla 9. (Continuación)

Tan- que	Piso	Sismo							Prome- dio	Deriva
		Coalin- ga	Duzce	Helena	Loma Prieta	Mam moth	Monte- negro	Mendo- cino		
4	0	0,648	0,551	0,527	0,633	0,394	0,601	0,608	0,566	0
	1	0,665	0,566	0,541	0,651	0,405	0,618	0,625	0,582	0,015
	2	0,676	0,575	0,55	0,661	0,412	0,628	0,635	0,591	0,01
	3	0,685	0,582	0,557	0,67	0,417	0,636	0,643	0,599	0,008
	4	0,691	0,588	0,562	0,677	0,422	0,643	0,649	0,605	0,006
	5	0,693	0,589	0,563	0,678	0,423	0,644	0,65	0,606	0,001
5	0	0,644	0,554	0,537	0,67	0,445	0,663	0,595	0,587	0
	1	0,661	0,569	0,551	0,689	0,458	0,681	0,611	0,603	0,016
	2	0,672	0,578	0,56	0,7	0,465	0,692	0,621	0,613	0,01
	3	0,681	0,585	0,568	0,709	0,471	0,702	0,629	0,621	0,008
	4	0,688	0,591	0,574	0,717	0,476	0,709	0,636	0,627	0,007
	5	0,691	0,593	0,576	0,719	0,478	0,712	0,638	0,63	0,002
6	0	0,653	0,558	0,544	0,68	0,462	0,663	0,601	0,595	0
	1	0,671	0,573	0,559	0,699	0,475	0,682	0,618	0,611	0,016
	2	0,682	0,582	0,569	0,71	0,483	0,693	0,628	0,621	0,01
	3	0,691	0,589	0,576	0,719	0,489	0,702	0,636	0,629	0,008
	4	0,698	0,595	0,582	0,727	0,494	0,709	0,642	0,635	0,006
	5	0,699	0,597	0,584	0,729	0,496	0,711	0,644	0,637	0,002

Los datos registrados en la Tabla 9 están en unidades de metros [m].

### 7.2.2 Fuerza cortante y momento flector

Las fuerzas inducidas de cortante basal y momento flector máximas, fueron obtenidas de igual forma que para los casos con base fija, los resultados se registran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de fuerza cortante máxima y momento flector máximo obtenidos del análisis dinámico para tanques de base aislada.

Tanque	Parámetro	Sismo							Promedio
		Coalinga	Duzce	Helena	Loma Prieta	Mammoth	Montenegro	Mendocino	
1	V	1069	814,5	881,7	618,4	658,5	477,9	1022	791,8
	M	3249	2398	2601	1929	2031	1376	3068	2379
2	V	1128	867,1	887,6	1017	662,7	490	1028	868,7
	M	3353	2488	2554	3129	1948	1375	3025	2553
3	V	1121	908,1	902,1	980,9	677,9	516,5	1022	875,5
	M	3294	2580	2584	2917	1977	1463	2968	2540
4	V	1131	749,8	920,8	1107	660,9	533,2	1015	874
	M	3507	2259	2787	3483	2109	1600	3078	2689
5	V	1133	720,3	934,2	1119	674,3	574,3	1028	883,3
	M	3555	2213	2977	3719	2166	1743	3190	2795
6	V	1149	717,1	956,9	1133	684,2	590,5	1019	892,8
	M	3643	2254	3034	3713	2222	1849	3203	2845

Los valores de fuerza cortante (V) están dados en kN y los momentos flectores (M) en kN-m.

### 7.2.3 Periodo fundamental de la estructura

Para esta condición de apoyo de la estructura se muestra el resultado obtenido de periodo estructural en cada tanque, con el fin de verificar la incorporación del aislador, teniendo en cuenta que fue diseñado para un periodo de 2.5 seg, y que se espera obtener valores cercanos a este objetivo. La Tabla 11 muestra los periodos estructurales obtenidos para el modo de mayor participación en cada tanque.

Tabla 11. Periodos estructurales de los tanques con base fija y aislada.

Tanque	T [s] sin aislar	T[s] aislado
1	0,44	2,30
2	0,43	2,27
3	0,43	2,25
4	0,46	2,35
5	0,47	2,39
6	0,47	2,39

### 7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se comparan los resultados obtenidos para cada uno de los tanques, como se muestra en la Tabla 12. Las Figuras de la 5 a la 16 comparan los desplazamientos y las derivas de cada uno de los tanques, estas permiten ver el incremento de los desplazamientos horizontales y la tendencia de la estructura a desplazarse en conjunto con todos sus pisos luego de ser aislada, notable además en la reducción de las derivas de piso.

En la Tabla 12 se pueden observar las reducciones en el cortante basal y en el momento flector, que prueba la efectividad de la implementación del aislador. Además las Figuras de la 17 a la 30, muestran la variación favorable de la respuesta obtenida de los tanques analizados en términos de estas fuerzas inducidas.

También es posible notar una influencia de las características geométricas del tanque (Tabla 12) en el comportamiento de la estructura, donde de acuerdo a la relación ancho/alto, se obtiene un mejor desempeño del aislador. El tanque 1, con una relación de 1.67, mostró respuesta sísmica, y se puede observar que el aislador

tiende a tener más eficiencia a medida que la relación ancho/altura se acerca a este valor.

Tabla 12. Comparación de la respuesta sísmica para los tanques analizados.

Tanque	Ancho/Alto	Desplazamiento máximo [%]	% de Reducción de cortante	% de Reducción de momento
1	1,67	460,8	77,7	94,1
2	2,33	545,1	74,8	93,4
3	2,86	577,7	73,9	77,2
4	1,22	515,0	76,5	93,8
5	1,05	488,3	76,8	93,8
6	0,85	518,6	76,1	93,8

Figura 5. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 1 con base fija y aislada.



Figura 6. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 2 con base fija y aislada.



Figura 7. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 3 con base fija y aislada.



Figura 8. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 4 con base fija y aislada.

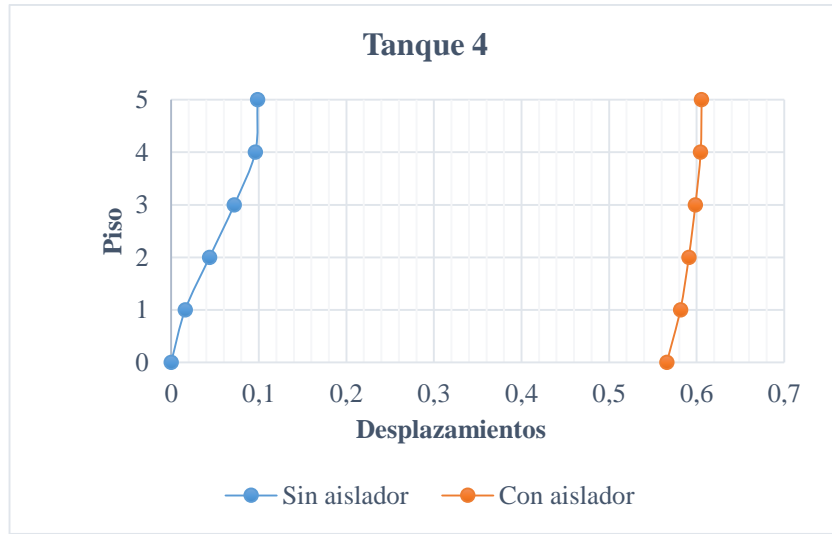


Figura 9. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 5 con base fija y aislada.



Figura 10. Comparación de desplazamientos horizontales para el tanque 6 con base fija y aislada.



Figura 11. Comparación de las derivas para el tanque 1 con base fija y aislada.

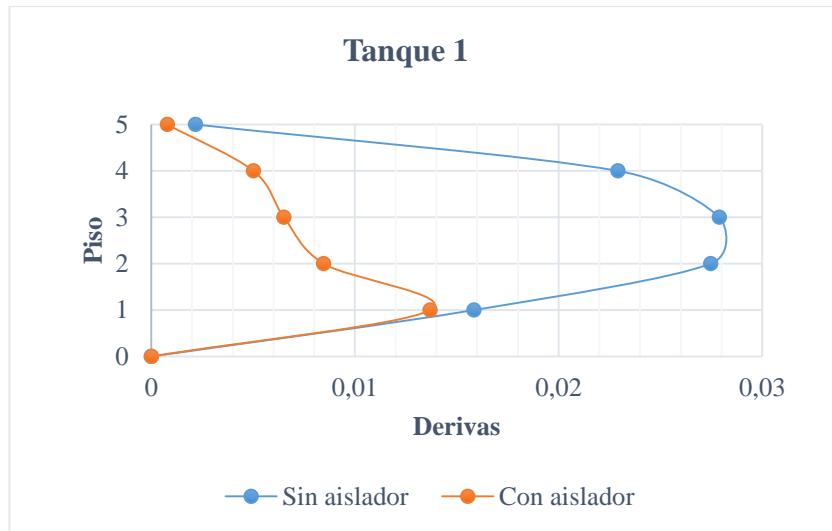


Figura 12. Comparación de las derivas para el tanque 2 con base fija y aislada.

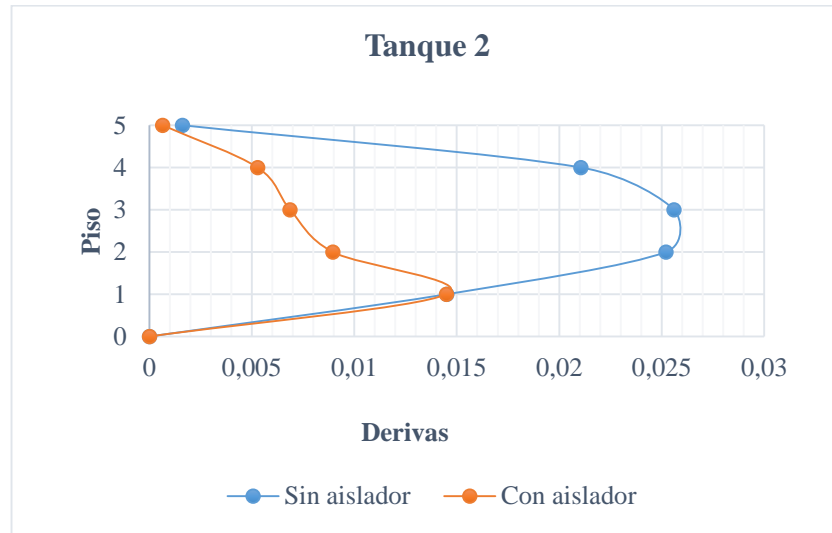


Figura 13. Comparación de las derivas para el tanque 3 con base fija y aislada.

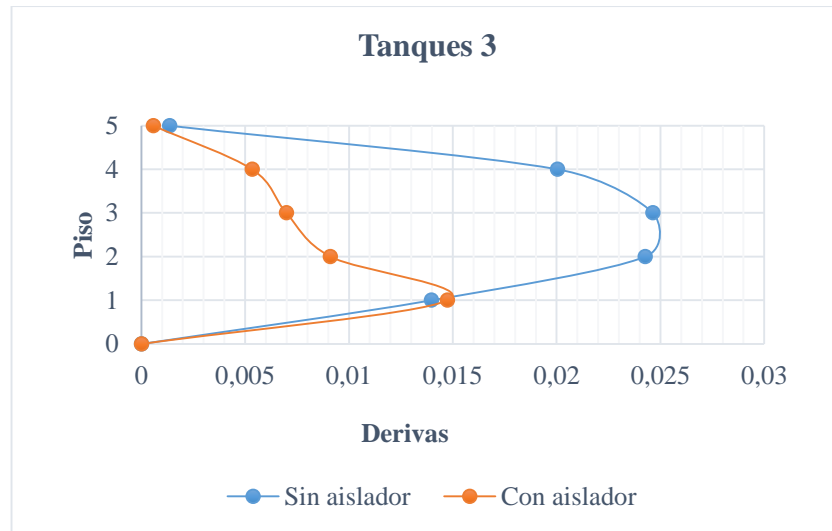


Figura 14. Comparación de las derivas para el tanque 4 con base fija y aislada.

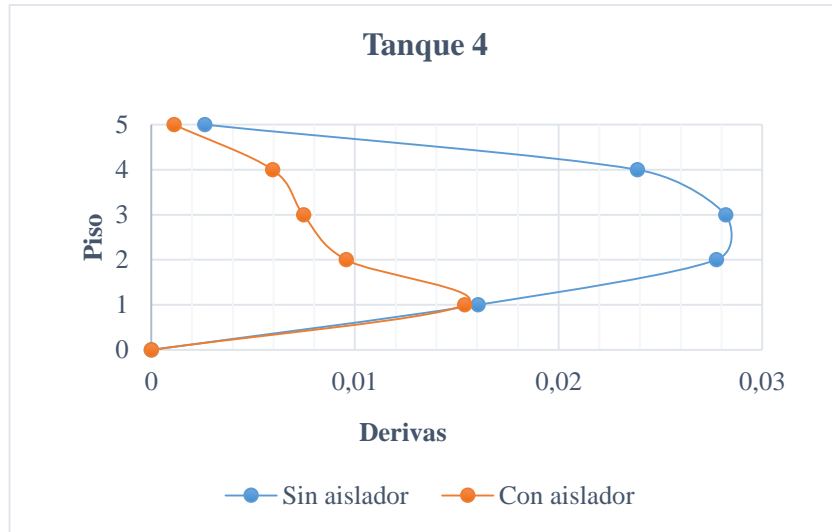


Figura 15. Comparación de las derivas para el tanque 5 con base fija y aislada.

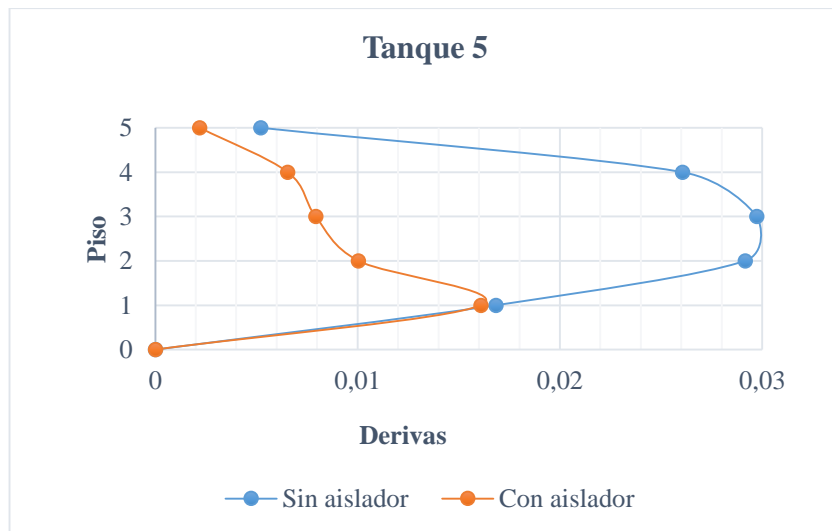


Figura 16. Comparación de las derivas para el tanque 6 con base fija y aislada.

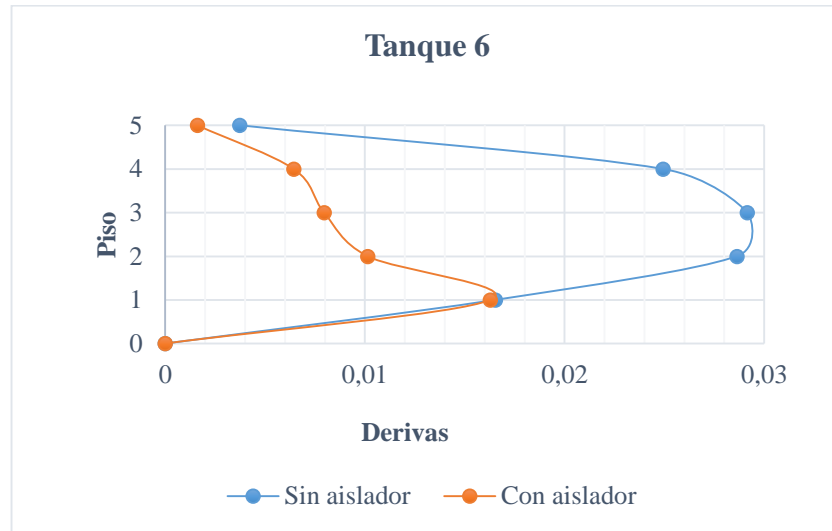


Figura 17. Comparación de la fuerza cortante inducida por el sismo de Coalinga en el tanque 1.

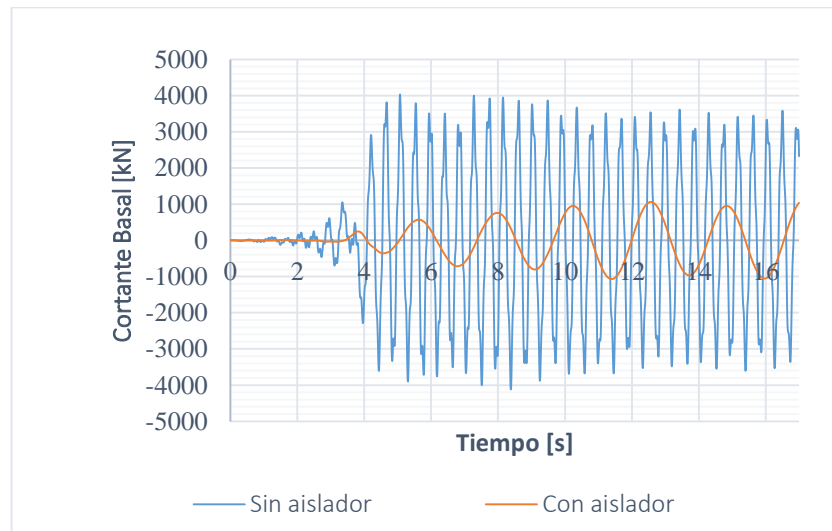


Figura 18. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Coalinga en el tanque 1.

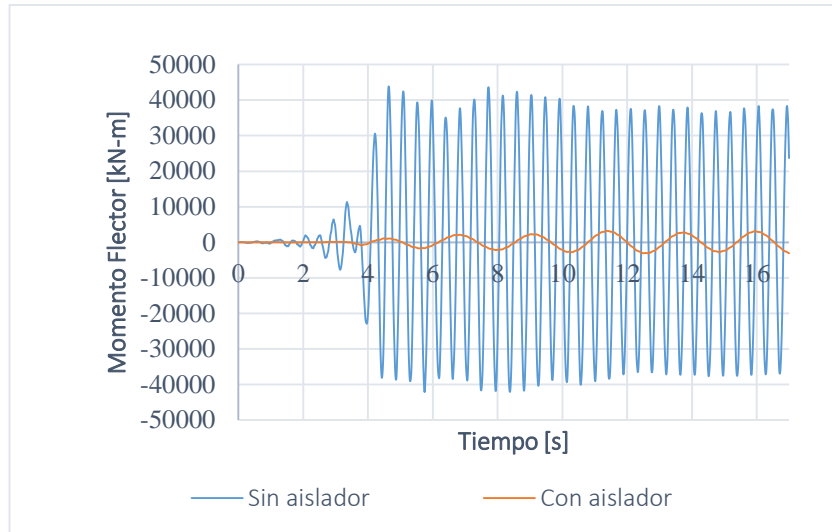


Figura 19. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Duzce en el tanque 1.

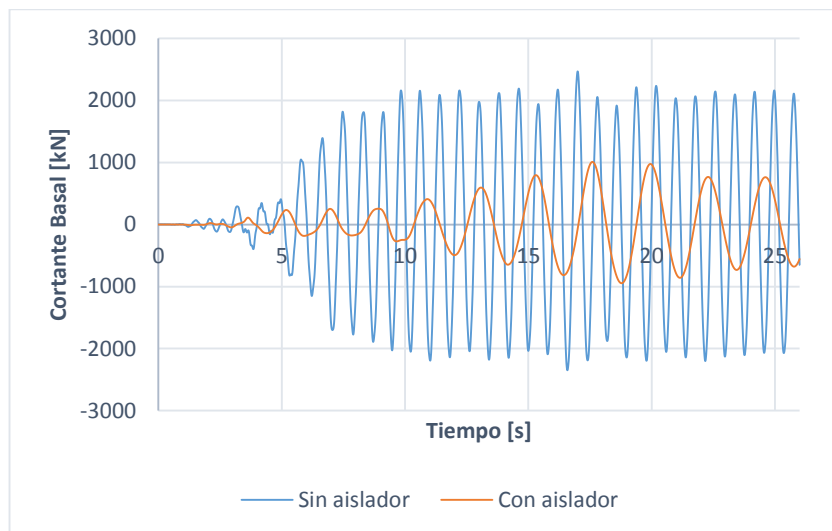


Figura 20. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Duzce en el tanque 1.

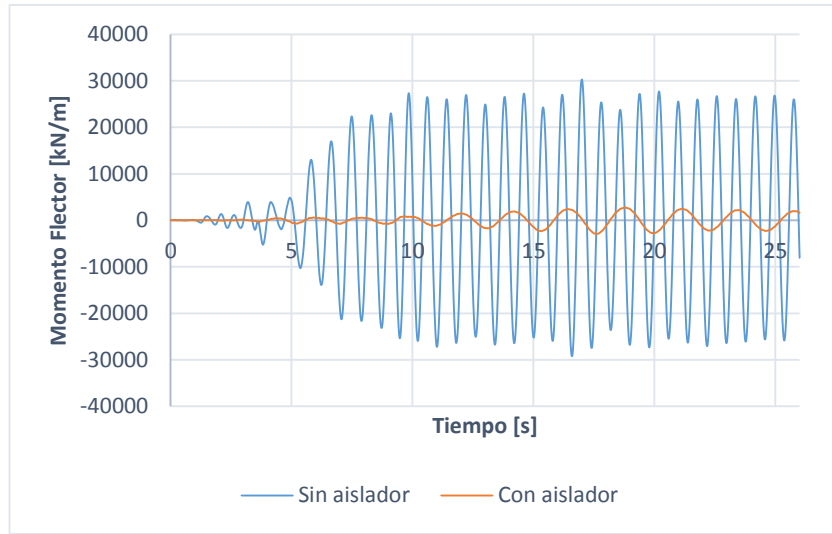


Figura 21. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Helena en el tanque 1.

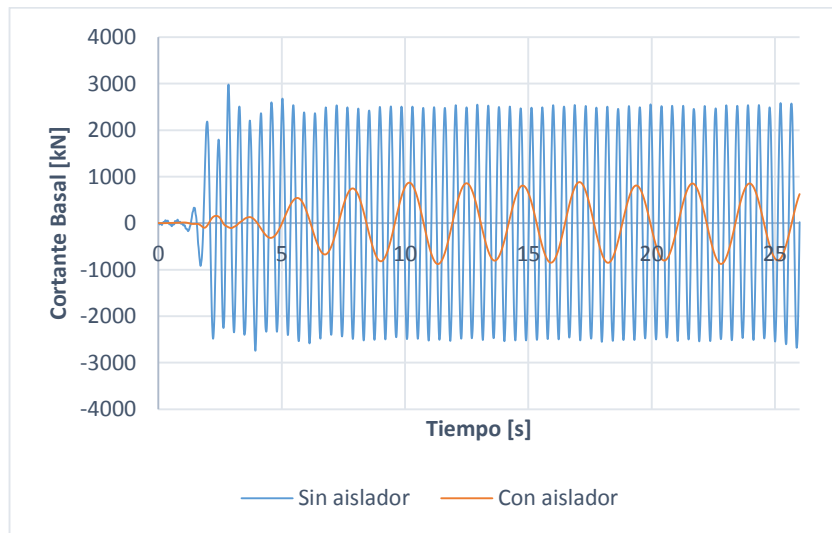


Figura 22. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Helena en el tanque 1.

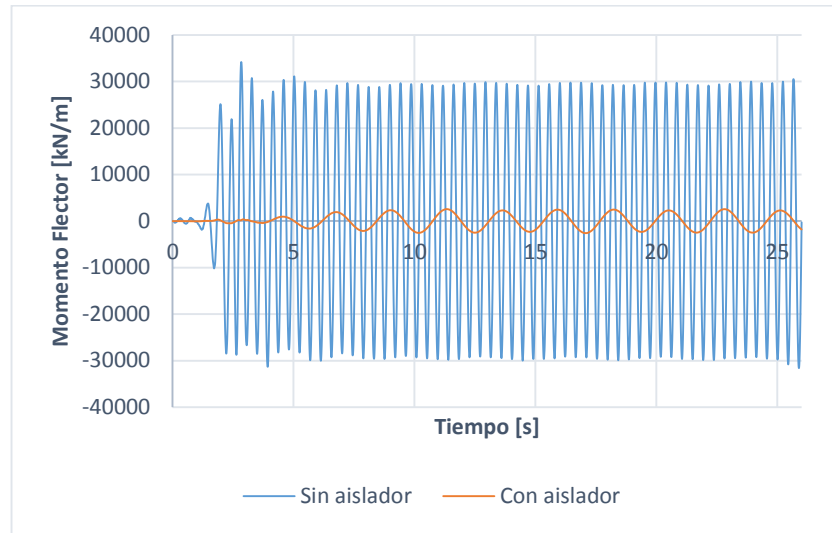


Figura 23. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Loma Prieta en el tanque 1.

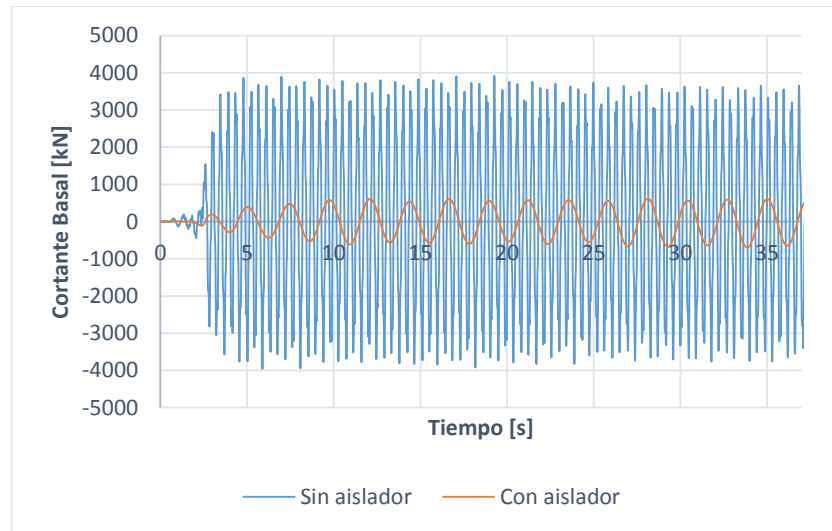


Figura 24. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Loma Prieta en el tanque 1.

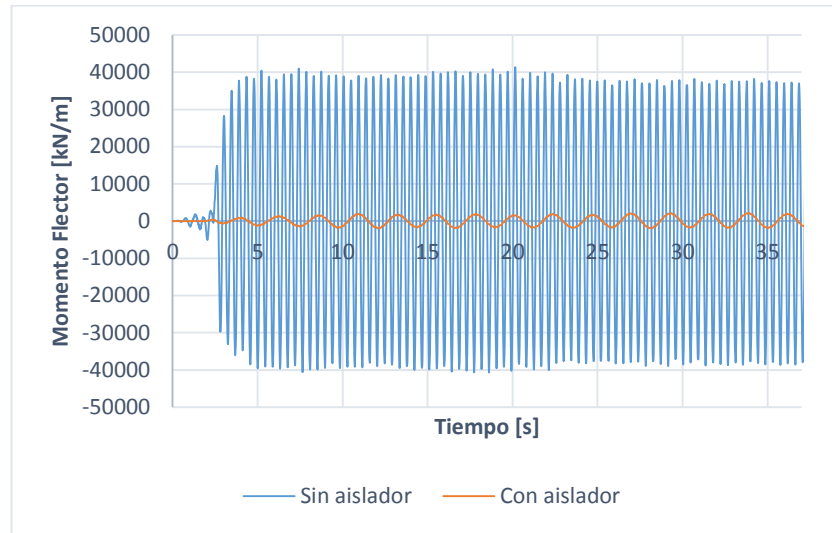


Figura 25. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Mammoth en el tanque 1.

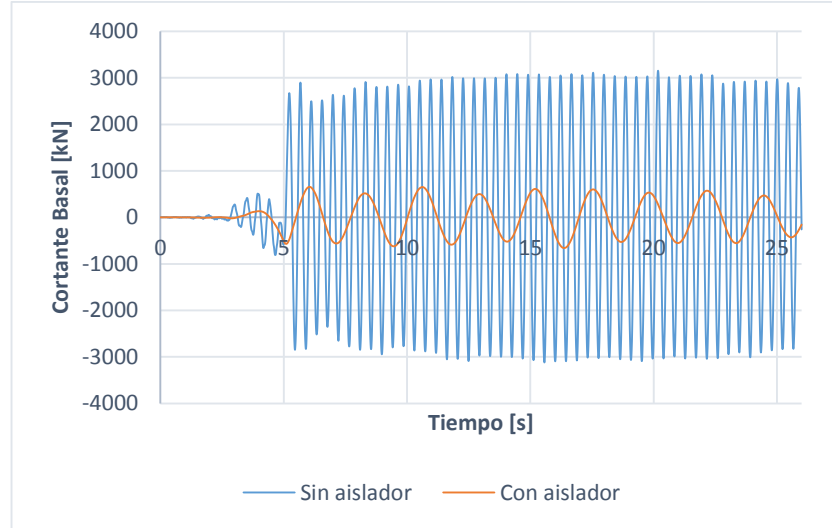


Figura 26. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Mammoth en el tanque 1.

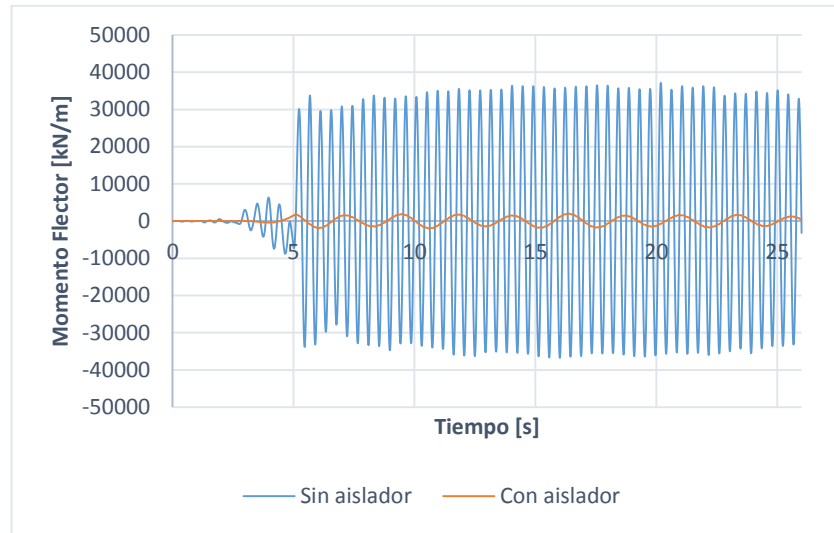


Figura 27. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Mendocino en el tanque 1.

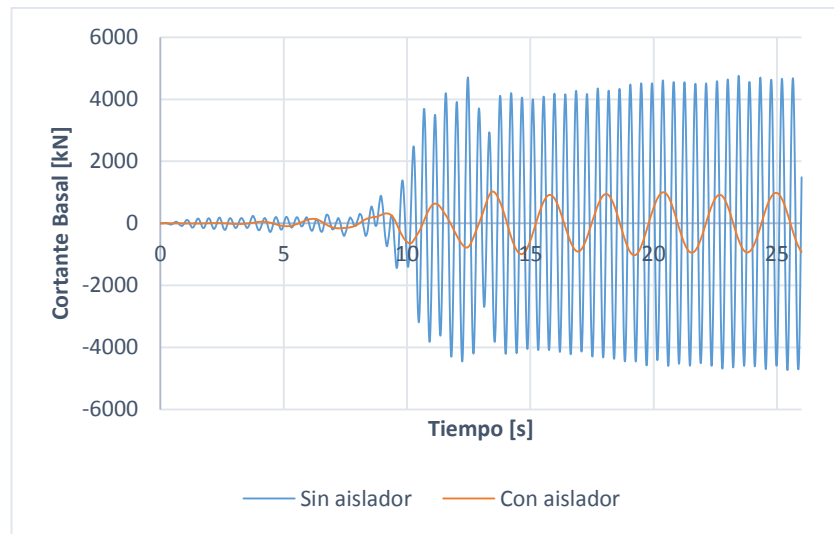


Figura 28. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Mendocino en el tanque 1.

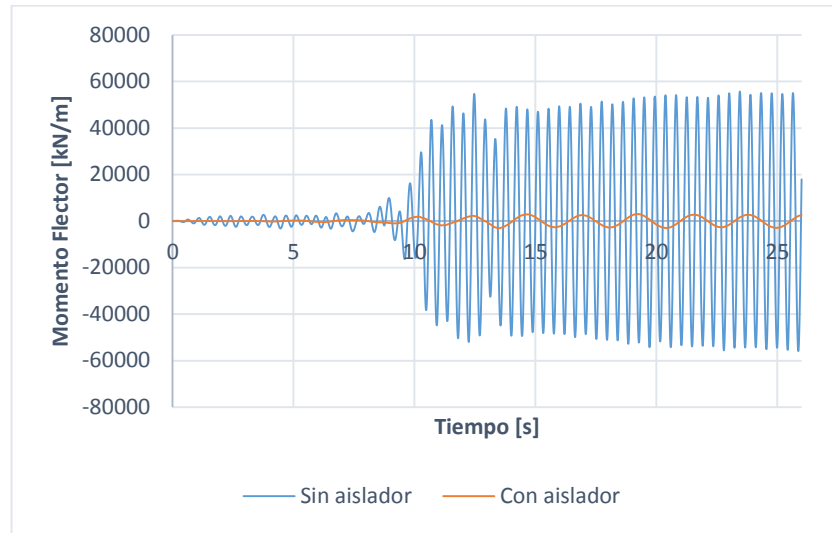


Figura 29. Comparación de la fuerza cortante inducido por el sismo de Montenegro en el tanque 1.

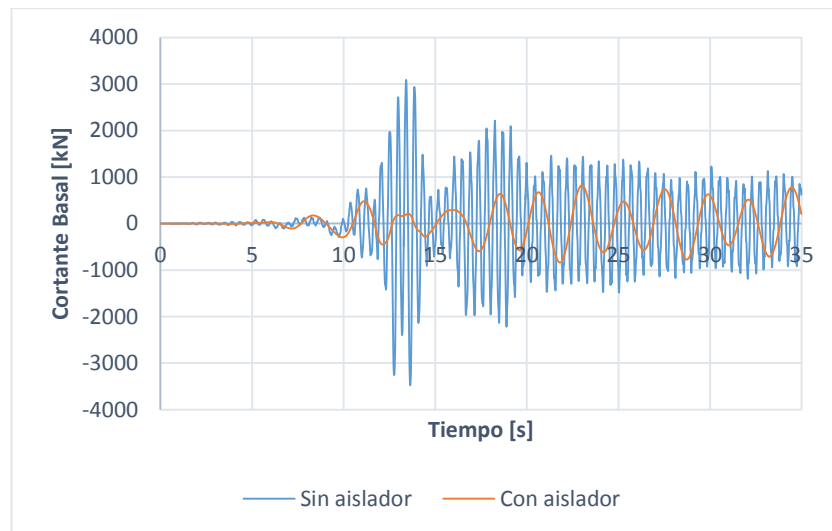
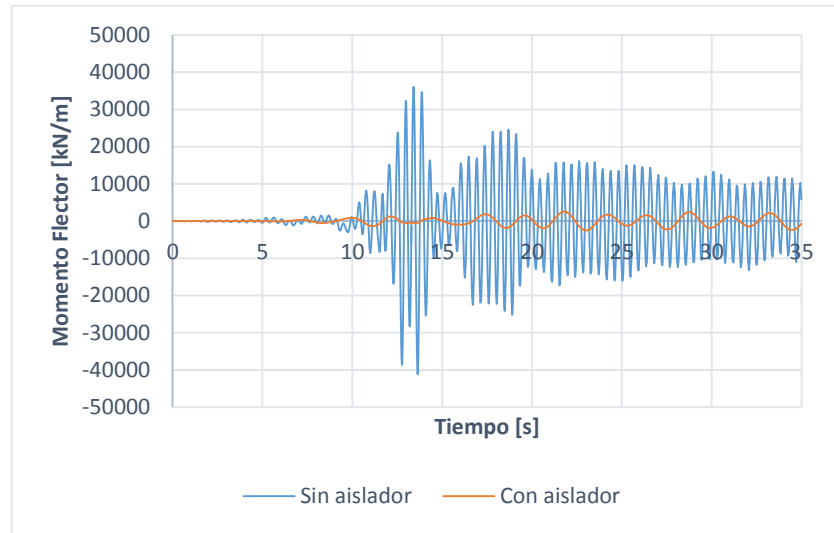


Figura 30. Comparación del momento flector inducido por el sismo de Montenegro en el tanque 1.



## 8. CONCLUSIONES

Los cálculos para modelo de Housner se realizaron según lo estipulado en el reglamento ACI350.3-0,1 donde se calculó un rigidez para la masa convectiva  $k_c$ , este valor se obtiene teniendo en cuenta ecuaciones básicas de dinámica estructural; al comparar este valor con el valor obtenido utilizando la fórmula original de Housner planteada en 1963, se encontró una diferencia aproximada del 0,2%, por lo que verifica la aproximación de las nuevas fórmulas al modelo original de Housner.

Con el proceso iterativo de diseño del aislador se pudieron obtener dimensiones adecuadas y posibles de fabricar, partiendo de fijar el período de diseño de la estructura en 2.5 seg, para encontrar buenos resultados en la respuesta sísmica de los tanques. Los valores obtenidos de periodo en la estructura luego de aislarse resultan aproximarse a este periodo objetivo, variando desde 2,3 a 2,4 en los seis tanques evaluados, para los modos de vibración con mayor participación.

El aislamiento de base resulta ser efectivo en el mejoramiento de la respuesta sísmica de los tanques de agua elevados, ya que se obtuvieron reducciones entre el 75% y 78% del cortante basal, y 77% a 94% del momento flector. Además se encontró un incremento de 500% aproximadamente en el desplazamiento horizontal, sin embargo, esto era un resultado esperado debido a la implementación del aislador, y su principio de funcionamiento, mientras que las derivas de piso son reducidas notablemente.

Se identificó que el aislador obtiene un mejor desempeño cuando la relación ancho/alto del tanque es cercana a 1.67, esto teniendo como parámetros de comparación las fuerzas inducidas en las estructuras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FERNÁNDEZ-DÁVILA GONZALES, Victor Iván. Study of the seismic response of r/c isolated elevated water tanks. En: WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 2012, vol. 59, p. 161.
  
- [2] ROSSI, Irina Juliao. Manizales, a la vanguardia en tecnología antisísmica. [En línea]. Unimedios: Universidad Nacional de Colombia. 2016. (Recuperado en Agosto 2017). Disponible en:  
<http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/manizales-a-la-vanguardia-en-tecnologia-antisismica.html>.
  
- [3] HOUSNER, George W. The Dynamic Behavior of Water Tanks. En: Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, vol. 53, no. 2, p. 381.
  
- [4] CHOPRA, Anil K. Dinámica de estructuras, Cuarta edición, México: Pearson Educación, 2014, p. 809.
  
- [5] AGUIAR FALCONÍ, Roberto, *et al.* Aisladores de Base Elastomericos y FPS, Primera Edición. Quito: CEINCI ESPE, 2008, p. 12.
  
- [6] MANRIQUE HORTA, Diego Felipe; MEZA ROSAS, Jairo Andrés. Evaluación técnica y de costos del uso de sistemas de control pasivo de respuesta sísmica en centros médicos: Caso de estudio aplicado a una estructura regular de siete pisos de altura ubicada en zona de amenaza sísmica intermedia. Tesis de maestría Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. 2016. p 27.
  
- [7] ARRIAGADA ROSAS, Jaime Andrés. Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos . ( Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional ). Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 2005. p 84.
  
- [8] SEISMOSOFT. Earthquake Engineering Software Solutions. [En línea]. Disponible en: <http://www.seismosoft.com/seismomatch>.

## BIBLIOGRAFÍA

AGUIAR FALCONÍ, Roberto, et al. Aisladores de Base Elastomericos y FPS, Primera Edición. Quito: CEINCI ESPE, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Seismic Design of Liquid -Containing Concrete Structures, in ACI 350.3-01 – Code requirements for environmental engineering concrete structures. 2001, p. 33-34.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. ASCE/SEI 7-16: Minimum design loads for buildings and other structures. 2017, p. 167-179.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIARÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente - NSR-10." 2010.

ARRIAGADA ROSAS, Jaime Andrés. Aislación Sísmica de un Edificio de Oficinas de Siete Pisos . ( Análisis Comparativo de Comportamiento y Costos con un Edificio Tradicional ). Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. 2005. 259 p.

CHOPRA, Anil K. Dinámica de estructuras, Cuarta edición, México: Pearson Educación, 2014, p. 809–834.

FERNÁNDEZ-DÁVILA GONZALES, Victor Iván. Study of the seismic response of r/c isolated elevated water tanks. En: WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 2012, vol. 59, p. 153–163.

HOUSNER, George W. The Dynamic Behavior of Water Tanks. En: Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, vol. 53, no. 2, p. 381–387.

INGEOMINAS, Subdirección de Amenazas Geoambientales. Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de bucaramanga. Bogotá, 2001.

MANRIQUE HORTA, Diego Felipe; MEZA ROSAS, Jairo Andrés. Evaluación técnica y de costos del uso de sistemas de control pasivo de respuesta sísmica en centros médicos: Caso de estudio aplicado a una estructura regular de siete pisos de altura ubicada en zona de amenaza sísmica intermedia. Tesis de maestría Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. 2016. 133 p.

PARDO RAMOS, Alejandro. Criterios de selección de acelerogramas reales para su uso en análisis dinámicos para la ciudad de Medellín. Tesis de maestría Medellín: Universidad de EAFIT. 2014. 93 p.

ROSSI, Irina Juliao. Manizales, a la vanguardia en tecnología antisísmica. [En línea]. Unimedios: Universidad Nacional de Colombia. 2016. (Recuperado en Agosto 2017). Disponible en: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/manizales-a-la-vanguardia-en-tecnologia-antisismica.html>.

SEISMOSOFT. Earthquake Engineering Software Solutions. [En línea]. Disponible en: <http://www.seismosoft.com/seismomatch>.