

**Comparación de la respuesta sísmica de silos en concreto a nivel del suelo para distintas relaciones altura-diámetro, utilizando aisladores en la base**

Presentado por:

Cristian Andres Lozada Perez, Fabián Armando Cely Buitrago

Trabajo de Grado para Optar el título en Ingeniería Civil

Director

Oscar Javier Begambre Carillo

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería de Estructuras, PhD en Ingeniería de Estructuras.

Codirector

Jesús Daniel Villalba Morales

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería de Estructuras, PhD en Ingeniería de Estructuras

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

### **Agradecimientos**

*A nuestros padres y madres, que nos apoyaron a través de todo el proceso de nuestra carrera, por los valores inculcados y por las oportunidades brindadas.*

*A nuestros directores Jesús Villalba y Oscar Begambre por la confianza, apoyo y por haber compartido con nosotros sus conocimientos.*

**Tabla de Contenido**

|  | Pág. |
|--|------|
| Introducción   | 12   |
| 1. Objetivos   | 14   |
| 1.1 Objetivo General                                   | 14   |
| 1.2 Objetivos Específicos                              | 14   |
| 2. Marco teórico                                       | 15   |
| 2.1 Definición del silo                                | 15   |
| 2.2 Sistemas de control estructural                    | 16   |
| 2.3 Clasificación de los sistemas de control           | 17   |
| 2.3.1 Control activo                                   | 18   |
| 2.3.2 Control semiactivo                               | 18   |
| 2.3.3 Control pasivo                                   | 18   |
| 2.4 Sistemas de aislamiento sísmico                    | 18   |
| 2.4.1 Aislador de péndulo friccional                   | 19   |
| 2.4.2 Aislador friccional                              | 19   |
| 2.4.3 Aisladores elastómericos                         | 19   |
| 3. Metodología   | 19   |
| 3.1 Descripción de los silos analizados                | 21   |
| 3.1.1 Propiedades de los materiales                    | 23   |
| 3.1.2 Cargas consideradas                              | 23   |
| 3.2 Modelado de los silos                              | 23   |
| 3.2 Acelerogramas para el análisis lineal en el tiempo | 25   |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.1 Espectro de diseño   | 25 |
| 3.3.2 Escalado de los acelerogramas                                | 26 |
| 3.4 Definición del aislador LRB a implementar                      | 28 |
| 3.4.1 Distribución de los aisladores                               | 29 |
| 3.4.2 Calculo de la rigidez de cada aislador                       | 29 |
| 3.4.3 Modelado del aislador  | 31 |
| 3.5 Análisis lineal en el tiempo en SAP2000                        | 32 |
| 3.5.1 Obtención de derivas y periodos con la estructura asilada    | 33 |
| 4. Resultados  | 36 |
| 4.1 Resultados promedio para cada silo                             | 41 |
| 4.2 Comparación de derivas para cada relación diámetro-altura      | 43 |
| 4.3 Comparación de las derivas para cada silo con y sin aisladores | 44 |
| 4.4 Comparación de los periodos de los silos aislados y sin aislar | 46 |
| 4.5 Verificación del comportamiento del aislador                   | 47 |
| 5. Conclusiones  | 48 |
| Referencias  | 50 |

**Lista de Tablas**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Variacion del diámetro y la altura para cada silo.  | 22 |
| Tabla 2. Peso del contenido para cada silo.  | 24 |
| Tabla 3. Periodos de vibración para cada silo.   | 25 |
| Tabla 4. Desplazamientos máximos para el silo F sin aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3. | 35 |
| Tabla 5. Desplazamientos máximos para el silo F con aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3. | 35 |
| Tabla 6. Periodos de los silos aislados sismicamente en la base.   | 36 |
| Tabla 7. Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo A.  | 44 |
| Tabla 8. Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo B.  | 45 |
| Tabla 9. Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo C.  | 45 |
| Tabla 10. Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo D.   | 45 |
| Tabla 11. Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo E.   | 46 |
| Tabla 12. Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo F.   | 46 |
| Tabla 13. Comparación de periodos con y sin aislamiento.   | 47 |
| Tabla 14. Desplazamiento en la base del aislador para cada silo.   | 48 |

**Lista de Figuras**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Sistema de un grado de libertad. Fuente: Oviedo y Duque (2006).   | 17 |
| Figura 2. Plan metodológico.  | 21 |
| Figura 3. Esquema del silo en estudio.  | 22 |
| Figura 4. Creación del elemento estructural muro.   | 23 |
| Figura 5. Centros de masa, silo D.  | 24 |
| Figura 6. Espectro de diseño.   | 26 |
| Figura 7. Acelerogramas originales y escalados.   | 27 |
| Figura 8. Distribución de los aisladores.   | 29 |
| Figura 9. Esquema Aislador LRB. Fuente: Aisladores elastoméricos de caucho y plomo serie LRB.<br>FIP INDUSTRIALE S.r.L. | 30 |
| Figura 10. Link tipo aislador de caucho.  | 31 |
| Figura 11. Configuración de las propiedades del aislador.   | 32 |
| Figura 12. Creación del caso de carga para el acelerograma Coalinga.  | 33 |
| Figura 13. Eje donde se evaluaron los desplazamientos.  | 34 |
| Figura 14. Gráfica de desplazamientos para el silo F sin aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3.     | 34 |
| Figura 15. Gráfica de desplazamientos para el silo F con aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3.     | 35 |
| Figura 16. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Coalinga.   | 37 |
| Figura 17. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Mammoth.  | 37 |
| Figura 18. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Helena.   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Friulli.                   | 38 |
| Figura 20. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Duzce.                     | 38 |
| Figura 21. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Montenegro.                | 38 |
| Figura 22. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Whittier.                  | 39 |
| Figura 23. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Mendocino.                 | 39 |
| Figura 24. Gráfica de derivas sin aisladores para todos los casos de carga del silo F. | 40 |
| Figura 25. Gráfica de derivas con aisladores para todos los casos de carga del silo F. | 40 |
| Figura 26. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo A.           | 41 |
| Figura 27. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo B.           | 41 |
| Figura 28. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo C.           | 42 |
| Figura 29. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo D.           | 42 |
| Figura 30. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo E.           | 42 |
| Figura 31. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo F.           | 43 |
| Figura 32. Gráfica comparativa de derivas para cada relación H/D sin aisladores.       | 43 |
| Figura 33. Gráfica comparativa de derivas para cada relación H/D con aisladores.       | 44 |
| Figura 34. Gráfica de H/D vs periodo de los silos sin aislar.                          | 47 |

**RESUMEN**

**TITULO:** COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE SILOS EN CONCRETO A NIVEL DEL SUELO PARA DISTINTAS RELACIONES ALTURA-DIÁMETRO, UTILIZANDO AISLADORES EN LA BASE. \*

**AUTORES:** FABIÁN ARMANDO CELY BUITRAGO\*\*  
CRISTIAN ANDRES LOZADA PEREZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** AISLADORES DE BASE, SILOS EN CONCRETO, COMPARACIÓN, PERIODO ESTRUCTURAL, DERIVA MÁXIMA

**DESCRIPCIÓN:**

Los silos industriales siempre han sido identificables por almacenar material importante de difícil almacenamiento, en el cual se pretende garantizar un apropiado funcionamiento mientras se protege la integridad del contenido ante la ocurrencia de eventos naturales que puedan llevar a dañar la estructura como lo son los sismos. En muchas ocasiones métodos tradicionales han sido insuficientes para proveer un comportamiento seguro, por lo cual surge la necesidad del uso e introducción de nuevos métodos para el control de daño de estas estructuras.

Este proyecto tiene como objetivo el estudio del comportamiento de un silo cuando se implementa un sistema de aislamiento sísmico en su base, y que cambios genera este en su respuesta estructural a la vez que se varía su relación altura-diámetro. Se realiza la comparación de seis modelos principales de silos con diferentes relaciones de H/D, en los cuales se implementa un aislador LRB en la base, separando la estructura del silo de la cimentación.

Aplicando un análisis lineal a través del tiempo, y comparando la deriva máxima generada en un instante de tiempo, se comprueba que la respuesta de las derivas provocadas por los sismos disminuye considerablemente con la implementación de estos aisladores, aumentando el período natural del silo de tal forma que llegue a un punto donde el amortiguamiento del sistema es mayor.

\* Trabajo de grado

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

**ABSTRACT**

**TITLE:** COMPARISON OF THE SEISMIC RESPONSE OF CONCRETE SILOS AT GROUND LEVEL FOR DIFFERENT HEIGHT-DIAMETER RELATIONSHIPS, USING BASE ISOLATORS. \*

**AUTHORS:** FABIÁN ARMANDO CELY BUITRAGO\*\*  
CRISTIAN ANDRES LOZADA PEREZ\*\*

**KEYWORDS:** BASE ISOLATORS, CONCRETE SILOS, COMPARISON, STRUCTURAL PERIOD, MAXIMUM DERIVATIVE

**DESCRIPTION:**

Industrial silos have been identified to store important material of difficult storage, which is intended to ensure proper functioning while protecting the integrity of the content before the occurrence of natural events that may lead to damage the structure, such as earthquakes. On many occasions the methods have been insufficient to provide a safe behavior, so the need arises for the use and introduction of new methods to control the damage of these structures.

The objective of this project is to study the behavior of a silo when a seismic isolation system is implemented in its base, and what changes produces in the results of its structural response while varying with the height-diameter relationship. The comparison of six main models of silos with different H/D ratios is carried out, in which an LRB isolator is implemented in the base, separating the structure of the silo from the foundation.

Applying a linear analysis through time, and comparing the maximum derivative generated in a moment of time, it is verified that the response of the derivatives caused by earthquakes decreases considerably with the implementation of these isolators, thus increasing the natural period of the silo in such a way that it reaches a point where the damping of the system is higher.

\* Bachelor Thesis

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

## Introducción

La ciudad de Bucaramanga, localizada al nororiente de Colombia, se encuentra dentro de una zona de amenaza sísmica alta, debido principalmente a la existencia de fallas activas que pasan directamente por ella, a la geología de los materiales y a la morfología de alta montañas (Esperanza & Cho, 2007). Por esta razón se hace de vital importancia el adecuado diseño sísmico para edificaciones y líneas vitales.

Los silos industriales se utilizan para almacenar una gama enorme de diversos materiales. En las últimas décadas, muchas de estas estructuras fueron dañadas por eventos naturales, entre los cuales los terremotos fueron los más significativos, de hecho, se han construido plantas industriales con silos en zonas de alta sismicidad y la gran mayoría han sido diseñadas y construidas antes de las últimas actualizaciones de los códigos de diseño sísmico, por lo tanto, su fiabilidad sísmica actual es cuestionable (Kanyilmaz & Castiglioni, 2017).

Con el fin de evitar futuros problemas económicos y seguridad medioambientales para estas estructuras no habitables se han planteado soluciones de reacondicionamiento utilizando una gran variedad de dispositivos que se diferencian por la forma de cómo se disipa la energía de vibración impuesta a la estructura por el sismo. Los aisladores de base por medio del uso de una capa que separa la estructura y el suelo disminuyen significativamente la frecuencia natural de la estructura (Monfared, Shirvani, & Nwaubani, 2013).

El uso de estos sistemas pasivos de control como lo son los aisladores de base se ha ido popularizando en zonas de alta sismicidad a lo largo del mundo, ya que proporciona una forma alternativa de construcción y de reacondicionamiento que a lo largo de la duración de la vida de la estructura tiene un mejor comportamiento y una notable mejora en la respuesta sísmica.

Además, se dan grandes beneficios en la implementación de aisladores en etapas iniciales de diseño de la estructura, los cuales permiten la reducción de secciones de las estructuras sin comprometer el diseño y su comportamiento sísmico (Oviedo & Duque, 2006). Por otra parte, en países no muy desarrollados en los cuales los campos investigativos no se encuentran muy avanzados, el caso de Colombia, la forma tradicional de diseñar se encuentra muy arraigada, por esto es necesario expandir nuestras fuentes de conocimientos científica a través de la implementación de estos dispositivos (Oviedo & Duque, 2009).

Por lo tanto, los resultados de estos análisis serán de ayuda para la comunidad, donde se busca comprobar la funcionalidad de los aisladores de base por medio de comparaciones en sus derivas y el aumento del periodo natural de la estructura, generando un mejor comportamiento a diferencia de su contraparte no aislada.

A través de este artículo se expondrán los diferentes casos tratados de silos en donde se dispusieron los diámetros y alturas de tal manera que tuvieran diferentes relaciones. Para luego determinar el porcentaje de efectividad que tuvieron los aisladores en la mejora de cada uno de los silos, y se concluirá que configuración de silo tuvo una mejor respuesta.

Finalmente, en el capítulo cinco de conclusiones se dará respuesta a los objetivos planteados en la tesis.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Comparar la respuesta sísmica de seis relaciones altura-diámetro de silos circulares en concreto a nivel del suelo implementando aisladores en la base.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Contrastar los resultados de la respuesta sísmica de los silos en concreto para las distintas relaciones altura-diámetro, con y sin aisladores.
- Determinar la eficiencia respecto a las deformaciones, al emplear aisladores en cada uno de los modelos del silo.
- Establecer la relación altura-diámetro para la cual se presenta el mejor comportamiento sísmico con el uso de aisladores.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Definición del silo

Un silo es esencialmente un depósito o contenedor vertical, con el propósito de almacenar materiales finos hasta granos (Elías Chavéz, 2001). Estos silos son usualmente construidos en concreto representan una solución efectiva a problemas para carga y descarga de materiales, en donde por medio de celdas y orificios pueden entregar material en el momento que se necesite, mientras se mantiene segura su integridad en el tiempo que permanezca almacenado (Guillén Ascarza & Rojas Pérez, 2017).

Teniendo en cuenta que algunos factores influyen el comportamiento del silo, como el tipo de material a almacenar, su geometría y configuraciones de losa de descarga (Elías Chavéz, 2001) (Guillén Ascarza & Rojas Pérez, 2017), algunos autores clasifican los silos de acuerdo con sus condiciones geométricas:

#### Aproximaciones empíricas

- $H > 1.5D$  para silos circulares
- $H < 1.5a$  para silos rectangulares

Donde “D” es el diámetro y “a” es el lado más largo si su sección es circular o rectangular respectivamente.

Mientras que otras fuentes los clasifican directamente por su tipo de uso y geometría. (Blog Proymec, 2014)

- Silos para cemento
- Los silos tipo torre

- Los silos de hormigón
- Silo torre con bajo oxígeno
- Silos tipo Bunker
- Silos tipo bolsa
- Silos cónicos

## **2.2 Sistemas de control estructural**

Los sistemas de control estructural son métodos que buscan la prevención y la reducción de daños en las estructuras, controlando o disipando la energía que provoca un evento sísmico. Estos sistemas de control basan su funcionamiento en conceptos básicos de energía, en donde se usa la energía como herramienta para determinar el comportamiento y la respuesta de una estructura ante cargas sísmicas (Elías Chavéz, 2001).

A partir del sistema estructural considerado por Oviedo y Duque (2006), La figura 1, donde se idealiza un sistema estructural de un grado de libertad, donde lo conforma una masa ( $m$ ), la rigidez del elemento de soporte ( $k$ ), un coeficiente de amortiguamiento viscoso ( $c$ ), en el cual cuando el sistema está sometido a una carga sísmica, se desplaza en el terreno  $X_g(t)$ .

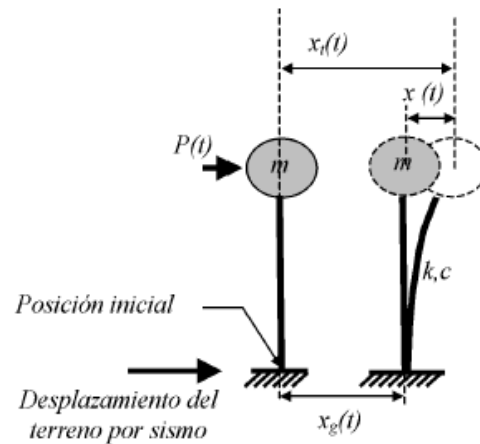


Figura 1. Sistema de un grado de libertad. Fuente: Oviedo y Duque (2006).

En donde el equilibrio dinámico está dado por la siguiente ecuación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g + p \quad (1)$$

Donde:

$m\ddot{x}$  representa la fuerza inercial de la masa de la edificación.

$c\dot{x}$  es el amortiguamiento inherente del sistema.

$kx$  es la fuerza elástica del sistema.

En el momento de utilizar sistemas de control, se debe considerar el aporte de estos dispositivos en la ecuación (1), ya que con su implementación modifica el amortiguamiento y rigidez del sistema.

### 2.3 Clasificación de los sistemas de control

Se pueden clasificar según la técnica de control que usan, entre ellos Control Pasivo, Control Semiactivo y activo e híbrido.

**2.3.1 Control activo.** Es un sistema que emplea dispositivos que necesitan de una fuente externa para ser accionados. Estos imparten fuerzas a las estructuras y también disipan energía. Su funcionamiento se basa en recibir información de las respuestas de la estructura (derivadas y rotaciones) por medio de sensores que se encargan de medir las variables y calculan la fuerza necesaria para accionar los actuadores de control y contrarrestar la acción sísmica (Ahumada Villafañe, 2010).

**2.3.2 Control semiactivo.** Los sistemas de control semiactivo son una clase de sistemas de control activo para los que la energía externa requerida es de menor orden de magnitud. Normalmente los dispositivos de control semiactivo no suministran energía mecánica al sistema. Estos dispositivos frecuentemente son considerados como dispositivos pasivos controlables (Gómez, Marulanda, & Thomson, 2007).

**2.3.3 Control pasivo.** Estos sistemas modifican la rigidez y/o la masa, favoreciendo la reducción de la respuesta sísmica. Estos pueden ser clasificados en tres diferentes tipologías: asilamiento sísmico, disipación de energía y amortiguador de masa sintonizado.

## **2.4 Sistemas de aislamiento sísmico**

Estos sistemas son generalmente implementados en la parte más baja de la estructura, separando la superestructura del terreno. Esto a su vez provoca que el sistema absorba de manera parcial la energía transmitida por el sismo.

**2.4.1 Aislador de péndulo friccional.** Estos dispositivos aíslan la estructura usando un efecto deslizante pendular. Este efecto es proporcionado por medio de una rótula la cual se desliza por acción del sismo sobre una superficie cóncava. Por ende, se disipa energía por causas de la fricción entre la rótula y la superficie cóncava (Arriagada Rosas, 2005).

**2.4.2 Aislador friccional.** Usan el mismo sistema de los aisladores de péndulo, solo que de forma más sencilla. Consistiendo en dos superficies, una adherida a la superestructura y la otra a la subestructura, poseen un bajo coeficiente de fricción, lo cual facilita el movimiento horizontal de la estructura (Manrique Horta & Meza Rosas, 2016).

**2.4.3 Aisladores elastómericos.** Conformados de materiales flexibles como el caucho natural dispuestos en serie de láminas intercaladas por placas metálicas y adheridas entre sí. Las principales características en estos aisladores son una alta rigidez vertical, flexibilidad horizontal y de ser necesario rigidez torsional. El material elastómero provee tanto de aislación sísmica como de flexibilidad lateral (Andrade & Tuxworth, 2009).

### 3. Metodología

El plan metodológico para la realización de la tesis se describe en la figura 2 que se compone de seis pasos principales:

1. Revisión bibliográfica, la cual consiste en la obtención de información actual y relevante sobre el modelado de silos con aisladores en la base, investigando en las distintas bases de datos

suministradas por la Universidad Industrial de Santander, tanto como artículos y publicaciones disponibles en la web.

2. Análisis de la información y definición del silo a modelar, con la información recopilada anteriormente se definió las dimensiones y materiales del silo como también el proceso de diseño de los aisladores para dicha estructura según la normativa vigente.

3. Modelado del silo en el software SAP2000, con el silo ya definido geométricamente se procede al modelamiento de seis silos con relación altura-diámetro diferente con y sin aisladores en la base.

4. Análisis lineal en el tiempo, se aplica un análisis lineal en el tiempo a los silos con las familias de acelerogramas escogidas para lograr la simulación de una fuerza sísmica y obtener resultados de periodos y derivas para los seis casos de silos con y sin aisladores.

5. Interpretación de resultados, con los resultados obtenidos de la etapa anterior se hace la comparación de derivas y periodos para identificar la eficiencia de los aisladores, y cómo influye el comportamiento del silo cambiando la relación altura-diámetro.

6. Conclusiones, en esta última etapa se procede a describir los resultados de la investigación y las recomendaciones pertinentes.

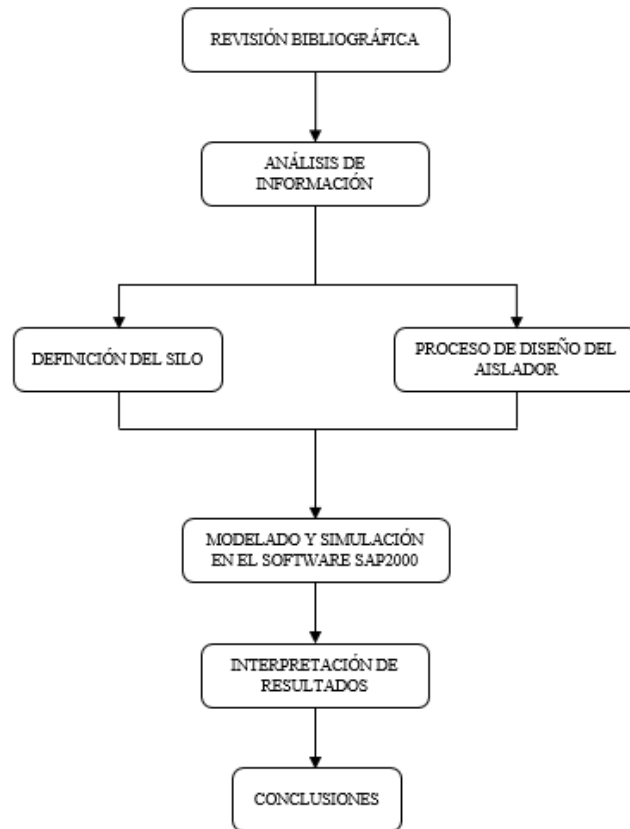


Figura 2. Plan metodológico.

### 3.1 Descripción de los silos analizados

El modelo escogido para el estudio es un silo circular individual en concreto con la losa de fondo apoyada sobre el terreno.

Para la realización de la tesis se presentan seis modelos estructurales de silos, cuya geometría se varió teniendo en cuenta la relación entre la altura y el diámetro.

Para obtener una relación  $H/d$  distinta en cada silo, se varía la altura y el diámetro, y en todos los casos se dejó constante el volumen y los espesores de los elementos estructurales. En los seis

modelos el volumen es de 1358 m<sup>3</sup> aproximadamente y se obtuvo relaciones H/d de 1.5 hasta 4 con variaciones de 0.5.

En la figura 3 se muestra las dimensiones de los elementos estructurales y en la tabla 1 la variación del diámetro y la altura para cada silo.

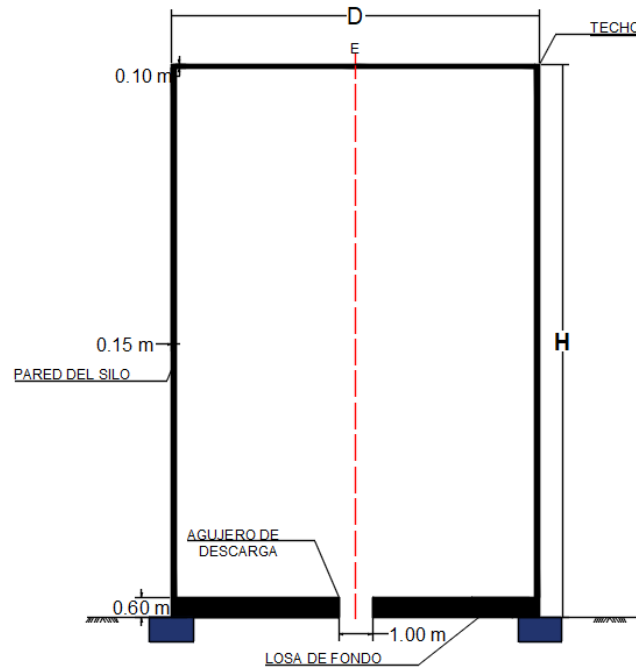


Figura 3. Esquema del silo en estudio.

Tabla 1  
Variación del diámetro y altura para cada silo.

| Silo     | H [m] | D [m] | H/D |
|----------|-------|-------|-----|
| <b>A</b> | 16.3  | 10.84 | 1.5 |
| <b>B</b> | 19.7  | 9.85  | 2.0 |
| <b>C</b> | 22.9  | 9.14  | 2.5 |
| <b>D</b> | 25.8  | 8.6   | 3.0 |
| <b>E</b> | 28.6  | 8.17  | 3.5 |
| <b>F</b> | 31.3  | 7.82  | 4.0 |

**3.1.1 Propiedades de los materiales.** Para la realización del estudio se define que el silo es utilizado para el almacenamiento de cemento el cual tiene un peso específico de 1600 Kg/m<sup>3</sup>. En el caso de los elementos estructurales de los silos, se utilizó un concreto con un  $f'c= 21\text{Mpa}$ .

**3.1.2 Cargas consideradas.** Para hacer el modelado se consideró como carga muerta el peso propio de la estructura y la masa de cemento almacenada que en este caso se asume que el silo está totalmente lleno que sería la situación más crítica ante la ocurrencia de un evento sísmico.

### 3.2 Modelado de los silos

Para hacer los respectivos análisis se procede a modelar los silos en el software SAP2000. Los elementos estructurales se dibujan como áreas de sección tipo Shell-Thick con las dimensiones anteriormente descritas. En la figura 4 se muestra el ejemplo de la creación del muro.

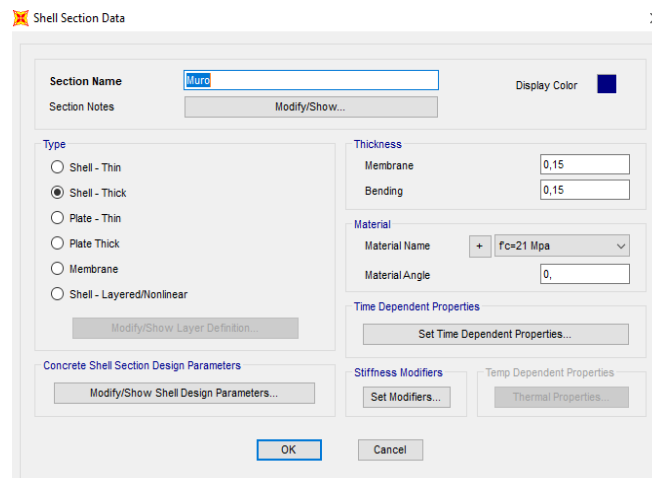


Figura 4. Creación del elemento estructural muro.

Para la carga que produce el cemento que contiene el silo, se halla la masa en KN y se crean cuatro centros de masas distribuidos de manera uniforme en toda su altura y se colocan en el centroide de la sección circular del silo.

Tabla 2.  
Peso del contenido para casa silo.

| Silo | V [m <sup>3</sup> ] | W [KN]  | CM [KN] |
|------|---------------------|---------|---------|
| A    | 1357.6              | 21722.0 | 5430.5  |
| B    | 1360.3              | 21764.1 | 5441.0  |
| C    | 1359.5              | 21751.4 | 5437.9  |
| D    | 1358.6              | 21737.7 | 5434.4  |
| E    | 1357.2              | 21715.2 | 5428.8  |
| F    | 1357.3              | 21717.0 | 5429.2  |

En la figura 5 se muestran los centros de masa distribuidos para el silo D, que en el software SAP2000 se ven como puntos.

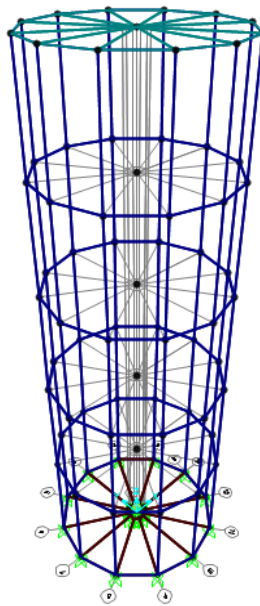


Figura 5. Centros de masa, silo D.

El anterior procedimiento de modelado se hace con los seis silos y obtenemos para cada uno el periodo característico, iniciando la simulación en el software. En la tabla 3 encontramos los resultados obtenidos de periodo para cada silo.

Tabla 3.  
Periodos de vibración para cada silo.

| Silo | T [s]    |
|------|----------|
| A    | 0.212168 |
| B    | 0.279533 |
| C    | 0.356877 |
| D    | 0.443614 |
| E    | 0.53877  |
| F    | 0.641523 |

### 3.2 Acelerogramas para el análisis lineal en el tiempo

Según el reglamento colombiano de construcción sismoresistente cuando se hace un análisis dinámico en el tiempo las familias de acelerogramas deben estar debidamente escalados al espectro de diseño según la amenaza.

**3.2.1 Espectro de diseño.** Para la creación del espectro de diseño se asume que el silo está ubicado en Bucaramanga, Santander y que su coeficiente de importancia (I) es de 1.50 que corresponde al grupo IV (edificaciones indispensables). Los valores para crear el espectro de diseño según la NSR-10 son:

- $A_a = 0.25$
- $A_v = 0.25|$
- $F_a = 1.15$

- $F_v = 1.55$
- $I = 1.50$

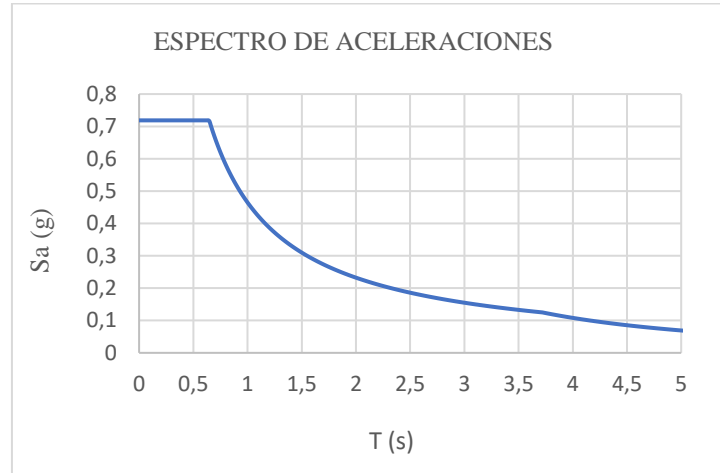


Figura 6. Espectro de diseño.

**3.3.2 Escalado de los acelerogramas.** Teniendo el espectro de diseño se procede al escalado de los acelerogramas, para este caso utilizamos ocho acelerogramas que son:

- Colainga
- Duzce
- Friulli
- Helena
- Mammoth
- Mendocino
- Montenegro
- Whittier

Para el escalado de los acelerogramas se utiliza el software SeismoMatch el cual permite ingresar todos los acelerogramas y escalarlos según el periodo de la estructura en estudio para acomodarlos al espectro de diseño. Se debe tener en cuenta que antes todos los acelerogramas deben estar corregidos en su línea base. En la figura 7 se muestra los acelerogramas cargados en el programa con el espectro de diseño.

Según la NSR-10 los acelerogramas se deben escalar de manera que en el rango comprendido entre  $0.8T$  y  $1.2T$ , donde  $T$  es el periodo de vibración fundamental de la estructura en estudio sean menores que el 80% de las ordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno definido por el espectro de diseño. Para esto se utilizó el periodo de vibración del silo F que es el más alto, teniendo el rango de periodo, se procede a ingresarlo en el programa SeismoMatch con un amortiguamiento del 5% para obtener los espectros escalados como se muestra en la figura 7, los cuales ya nos sirven para el análisis lineal en el tiempo.

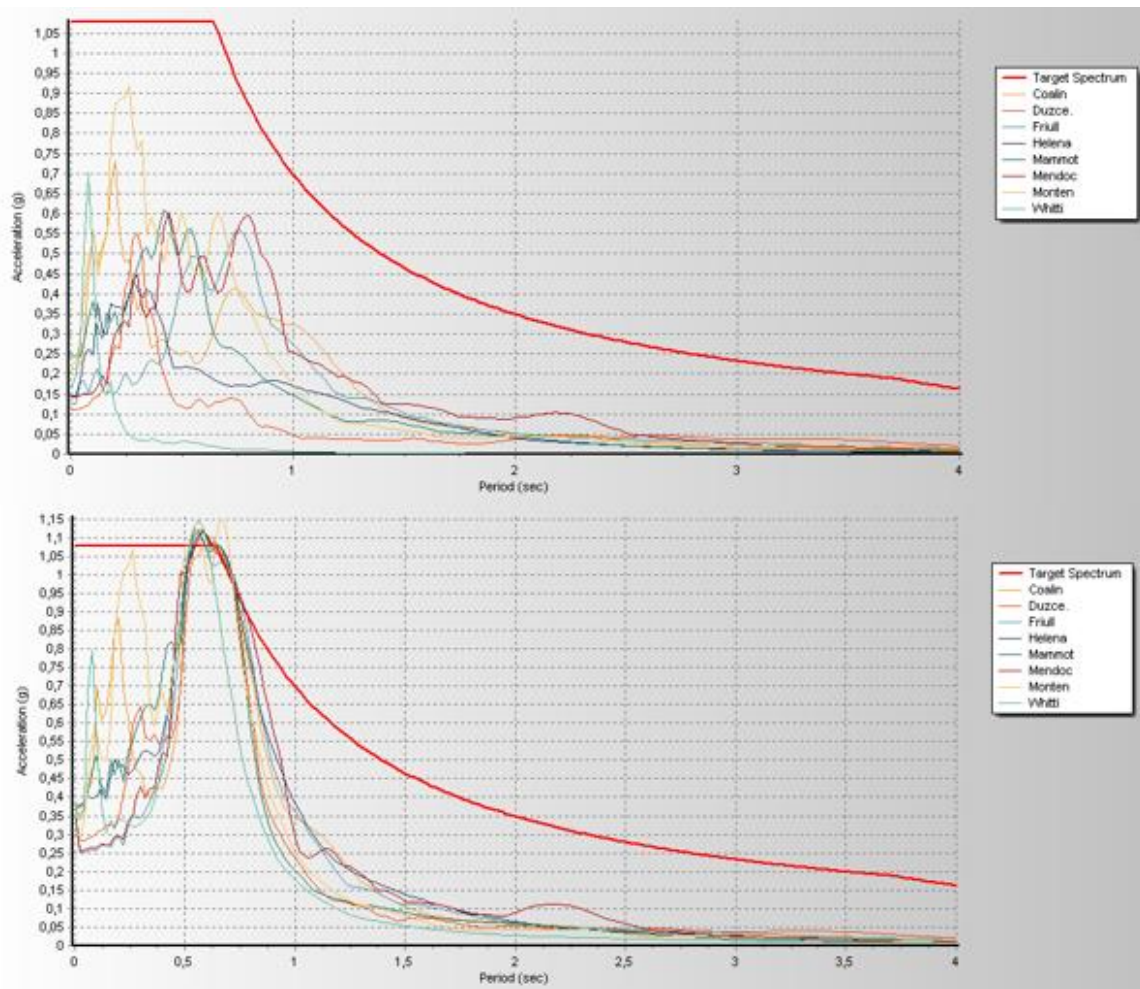


Figura 7. Acelerogramas originales y escalados.

### 3.4 Definición del aislador LRB a implementar

En la norma sismo resistente colombiana actual, el capítulo A.3.8 permite el uso de aisladores sísmicos en la base siempre y cuando se siga a totalidad los requisitos de las normas “NEHRP” o de la ASCE/SEI 7-05, por esto se seguirá el procedimiento de diseño señalado en la norma ASCE/SEI 7-05 para obtener las propiedades mecánicas del aislador a utilizar en cada uno de los silos.

En el capítulo 17 de la norma ASCE/SEI 7-05, el cual se titula requisitos de diseño sísmico para estructuras sísmicamente aisladas, en la fórmula 17.5 -2 nos permite hallar la rigidez horizontal que se necesita para el sistema aislado.

$$T_D = 2 * \pi \sqrt{\frac{W}{K * g}} \quad (2)$$

Donde:

$T_D$  = periodo efectivo en el desplazamiento de diseño

$W$  = peso efectivo de la estructura por encima del aislamiento

$K$  = rigidez mínima efectiva para el sistema de aislamiento en la dirección horizontal bajo consideración.

De la ecuación (2) se despeja la rigidez horizontal y luego se divide por el número de aisladores a implementar.

$$K_{Total} = \frac{4 * \pi * W}{T_D^2 * g} \quad (3)$$

$$K = \frac{K_{Total}}{n} \quad (4)$$

**3.4.1 Distribución de los aisladores.** Para esta investigación se utilizó ocho aisladores, cuatro distribuidos perimetralmente y los otros cuatro dentro de la sección circular, en la figura 8 se muestra su distribución de los aisladores.

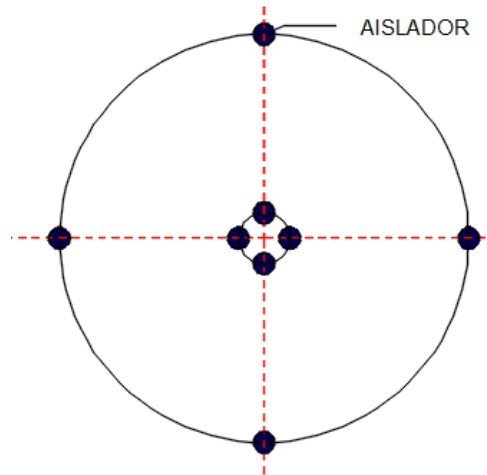


Figura 8. Distribución de los aisladores.

**3.4.2 Calculo de la rigidez de cada aislador.** Para el cálculo del periodo efectivo de diseño, se tiene en cuenta que el funcionamiento del aislador consiste en incrementar el periodo fundamental de la estructura aislada para llegar a aceleraciones y cortantes menores, por esto se halló el promedio de los periodos de los seis silos y se le sumo 2.2 segundos para garantizar que la diferencia entre el periodo de la estructura sin aislar y la estructura asilada este entre 2.0 a 2.5. El peso efectivo de la estructura es la suma del peso de los elementos estructurales y el contenido del silo. A continuación, se presentan los datos y el resultado de la rigidez horizontal por aislador:

- $T_D = 2.6120 \text{ seg}$
- $w = 25158 \text{ KN}$
- $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$
- $n = 8$

$$K_{Horizontal} = 1.85 \frac{KN}{mm}$$

Teniendo la rigidez horizontal para cada aislador, el paso a seguir es buscar en catálogos comerciales el aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB) que se acerque más al  $K$  calculado.

El catálogo encontrado es de la empresa italiana FIP INDUSTRIALE S.r.L., el cual tiene una alta gama de aisladores según las propiedades mecánicas que se soliciten.

Se seleccionó el aislador con el número de serie LRB-S 500/100-110 con desplazamiento máximo de 150 mm. A continuación, se muestran las propiedades mecánicas suministradas por el catálogo de la empresa:



Figura 9. Esquema Aislador LRB. Fuente: Aisladores elastoméricos de caucho y plomo serie LRB. FIP INDUSTRIALE S.r.L.

- $V = 3070 \text{ KN}$
- $K_v = 1579 \frac{\text{KN}}{\text{mm}}$
- $K_e = 1.86 \frac{\text{KN}}{\text{mm}}$
- $D_g = 550 \text{ mm}$
- $F_2 = 232 \text{ KN}$
- $Z = 600 \text{ mm}$
- $F_1 = 126 \text{ KN}$
- $h = 197 \text{ mm}$
- $d_1 = 8 \text{ mm}$
- $H = 247 \text{ mm}$

Donde:

$V$  = Carga máxima vertical

$K_e$  = Rigidez efectiva horizontal

$F_2$  = Fuerza horizontal máxima

$F_1$  = Fluencia por fuerza

$d_1$  = Fluencia por desplazamiento

$K_v$  = Rigidez vertical

$D_g$  = Diámetro externo del caucho

$Z$  = Longitud del lado de las planchas de acero externas

$h$  = Altura sin las planchas de acero externas

$H$  = Altura total

**3.4.3 Modelado del aislador.** Para introducir el aislador en el software SAP2000 y poder colocárselo a los silos, se procede a crear un link de apoyo del tipo aislador de caucho como se muestra en la figura 10.

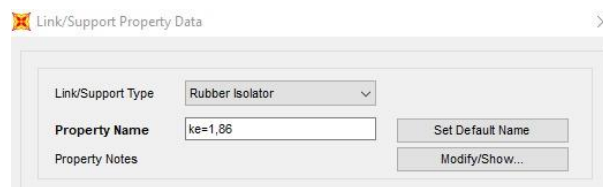


Figura 10. Link tipo aislador de caucho.

Luego se procede a introducir las propiedades de rigidez del aislador en las tres direcciones, en la figura 11 muestra donde se configura la rigidez del aislador para cada dirección,  $u_1$  es la dirección en el eje “z” en la cual se coloca la rigidez vertical  $K_v$  y las direcciones  $u_2$  y  $u_3$  que son el eje “x” y el eje “y” respectivamente, se coloca la rigidez horizontal  $K_e$ . Con estas

configuraciones se puede modelar el comportamiento del aislador para realizar el respectivo estudio a los silos.

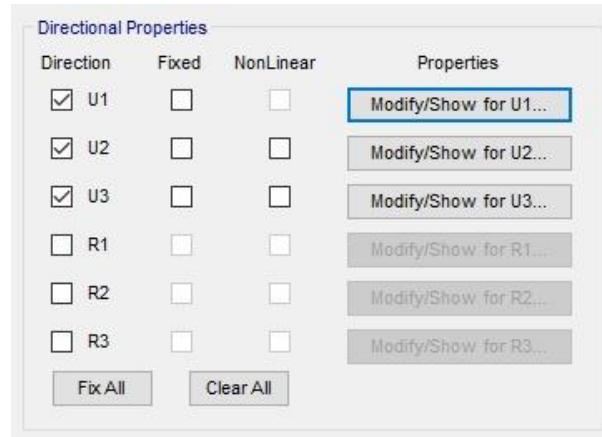


Figura 11. Configuración de las propiedades del aislador.

### 3.5 Análisis lineal en el tiempo en SAP2000

En esta etapa se procede a cargar en el programa los acelerogramas y se crea el caso de carga Time History con un análisis lineal y con una solución de tipo integración directa. En el análisis solo se tendrá en cuenta la componente “x” de la carga sísmica, como se puede observar en la figura 12. El anterior procedimiento se repite para los ocho acelerogramas para los silos con aisladores y sin aisladores.

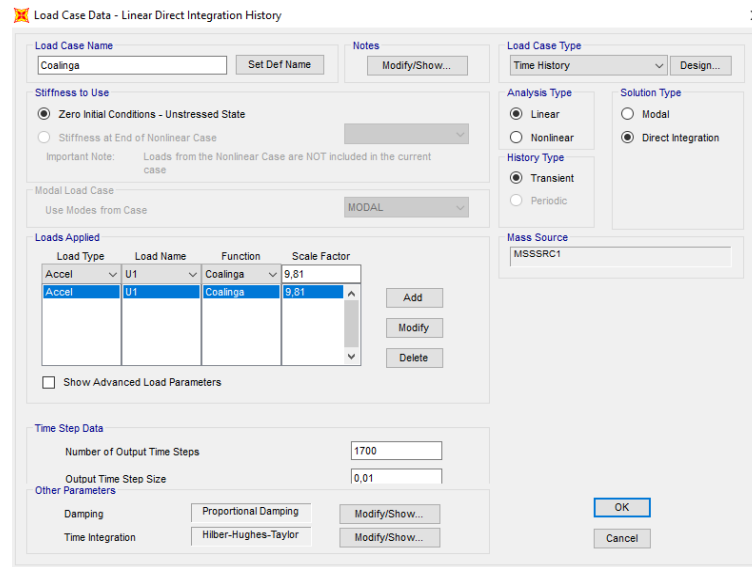


Figura 12. Creación del caso de carga para el acelerograma Coalinga.

**3.5.1 Obtención de derivas y periodos con la estructura asilada.** Teniendo los casos de carga para cada acelerograma se inicia la simulación para cada silo aislado y sin asilar con los ocho acelerogramas, en total serían 96 simulaciones.

Para hacer el cálculo de las derivas se debe obtener los desplazamientos, para esto se hace el análisis en un punto común en toda su altura. En este estudio, en el momento de la creación de los modelos se dividió la altura en cinco partes iguales lo que nos da seis puntos para obtener desplazamientos. Para un correcto análisis, se debe mirar los desplazamientos en función del tiempo y observar en que tiempo se da el desplazamiento más elevado, para esto se observa el último punto en el techo del silo que es donde se presentan los mayores desplazamientos, se exportan los datos de desplazamiento en función del tiempo y se busca el máximo, anotando el tiempo en el que se presentó para poder mirar los desplazamientos en los demás puntos en ese mismo segundo, de esta forma se asegura que las derivas se hallan en el tiempo donde se presenta los desplazamientos más críticos.

En las figuras 14 y 15 se muestran las gráficas que arroja SAP2000 de desplazamiento en metros en función del tiempo para cada punto del eje 3 y en las tablas 4 y 5 los resultados de los desplazamientos máximos y su tiempo de ocurrencia, estos resultados son para el silo F con y sin aisladores para el caso de carga Coalinga.

Los desplazamientos se hallaron para todos los casos en los puntos del eje 3 como se muestra en la figura 13.

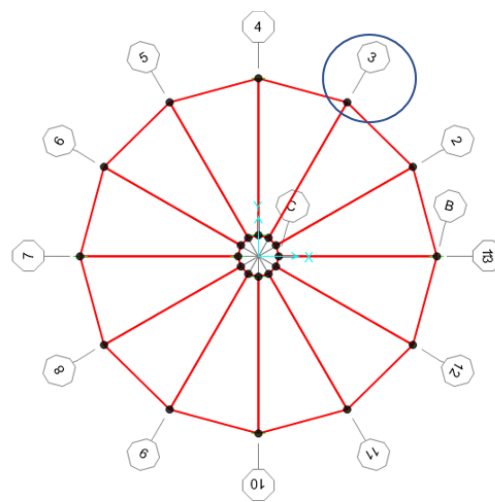


Figura 13. Eje donde se evaluaron los desplazamientos.

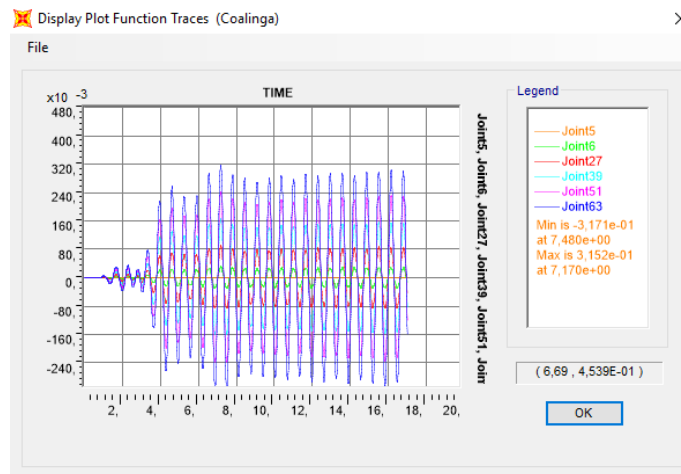


Figura 14. Gráfica de desplazamientos para el silo F sin aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3.

Tabla 4.

Desplazamientos máximos para el silo F sin aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3.

| Tiempo [s]  | Nodo | Desplazamiento [m] |
|-------------|------|--------------------|
| <b>7.48</b> | 0    | 0                  |
|             | 1    | 0.02712            |
|             | 2    | 0.0841             |
|             | 3    | 0.15913            |
|             | 4    | 0.23995            |
|             | 5    | 0.31715            |

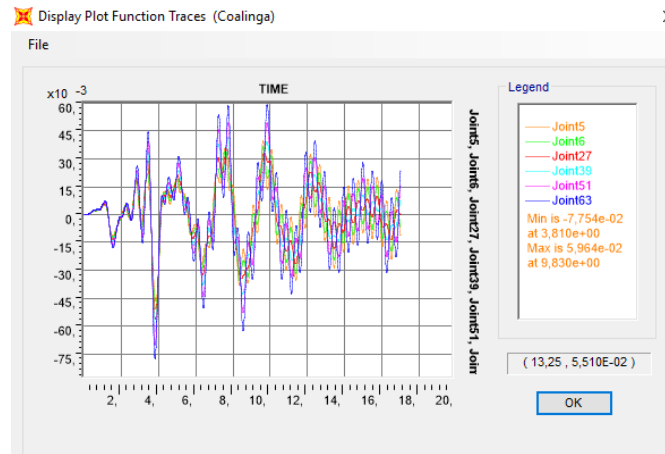


Figura 15. Gráfica de desplazamientos para el silo F con aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3.

Tabla 5.

Desplazamientos máximos para el silo F con aisladores caso de carga Coalinga en los puntos del eje 3.

| Tiempo [s]  | Nodo | Desplazamiento [m] |
|-------------|------|--------------------|
| <b>3.81</b> | 0    | 0.04516            |
|             | 1    | 0.05004            |
|             | 2    | 0.05623            |
|             | 3    | 0.06322            |
|             | 4    | 0.07045            |
|             | 5    | 0.07754            |

Este procedimiento se hace para todos los silos con todos los casos de carga descritos anteriormente, los cuales se plasmarán en el capítulo de resultados. A continuación, se muestra la tabla 6 que son los nuevos periodos de los silos con el uso de los aisladores.

Tabla 6.  
Periodos de los silos aislados sísmicamente en la base.

| <b>Silo</b> | <b>Periodo<br/>[s]</b> |
|-------------|------------------------|
| <b>A</b>    | 2.634123               |
| <b>B</b>    | 2.648892               |
| <b>C</b>    | 2.672504               |
| <b>D</b>    | 2.703983               |
| <b>E</b>    | 2.742914               |
| <b>F</b>    | 2.789467               |

#### **4. Resultados**

Debido al volumen de datos obtenidos tras el análisis de los silos, se muestran como ejemplo todos los resultados para el silo F.

En las figuras de la 16 a la 23 se muestran las gráficas de derivas halladas con los desplazamientos exportados desde SAP2000 para el silo F, en las cuales la curva verde representa el comportamiento del silo sin los aisladores y la curva marrón con la implementación de los aisladores.

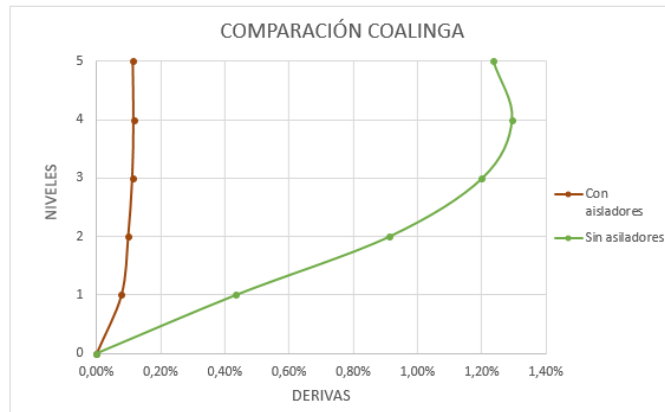


Figura 16. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Coalinga.

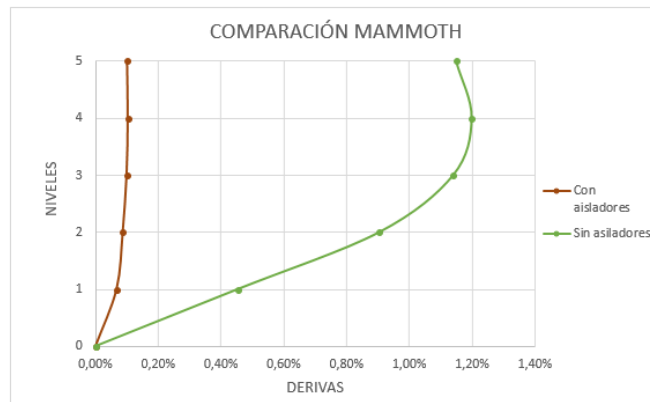


Figura 17. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Mammoth.

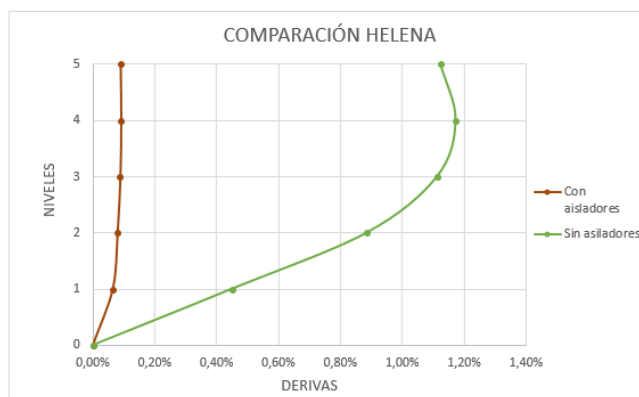


Figura 18. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Helena.

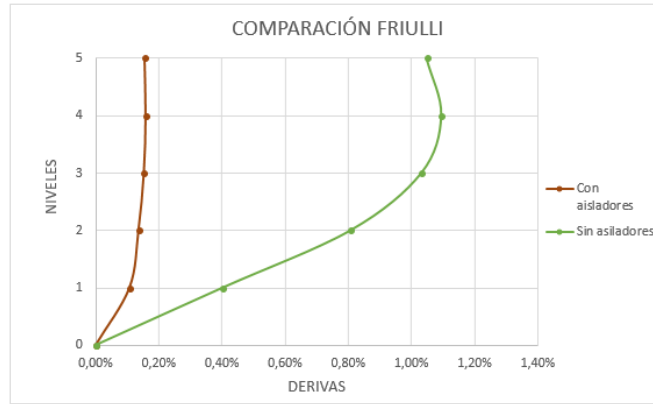


Figura 19. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Friulli.

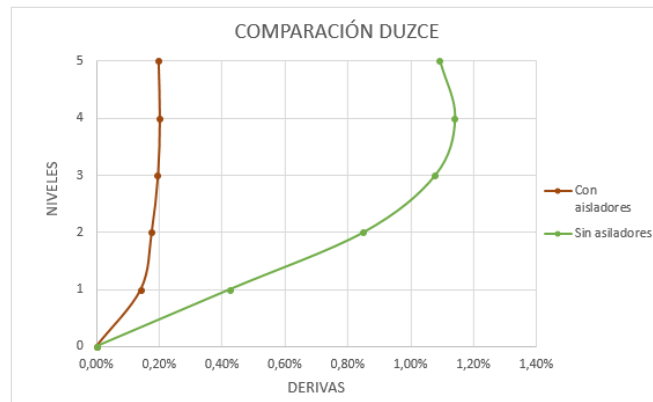


Figura 20. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Duzce.

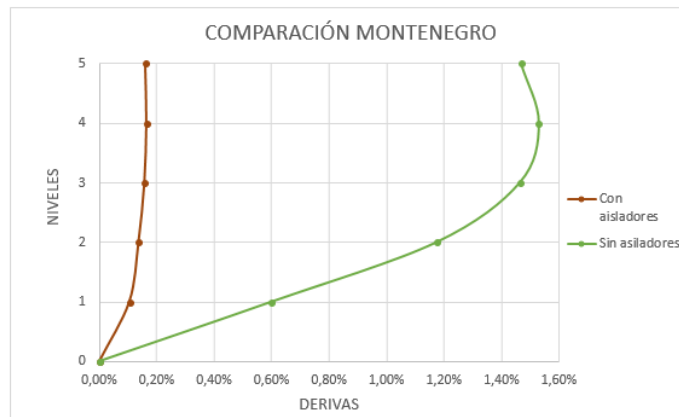


Figura 21. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Montenegro.

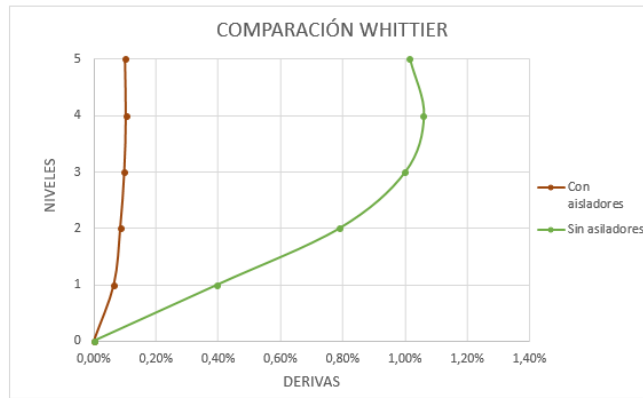


Figura 22. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Whittier.

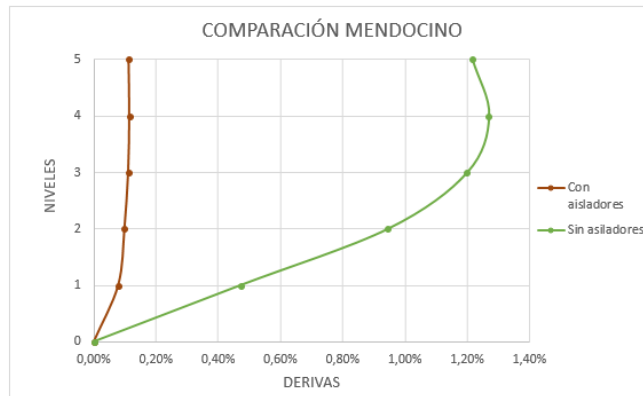


Figura 23. Gráfica de comparación de derivas, caso de carga Mendocino.

Se puede observar claramente que en todos los casos de carga la tendencia en las curvas son las mismas, con una disminución muy significativa de las derivas con el uso de los aisladores.

En las figuras 24 y 25 se contrasta en una sola gráfica las derivas de todos los casos de carga sin aisladores y con aisladores, se puede observar que el caso de carga más crítico sin aisladores es el de Montenegro, en cambio al implementar los aisladores, el caso de carga con las derivas más elevadas es el de Duzce.

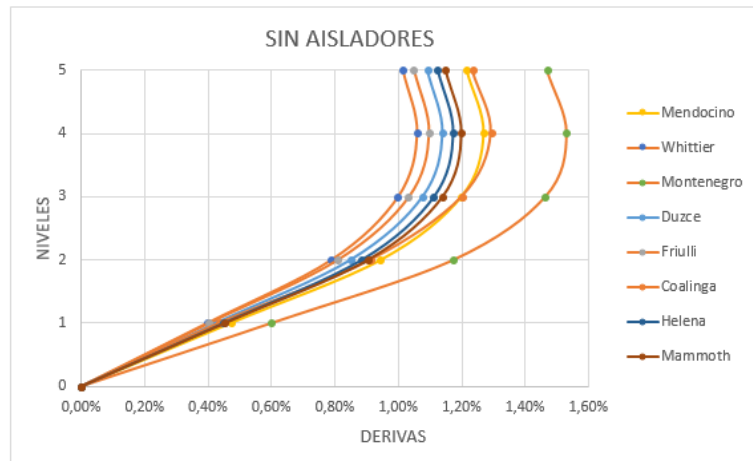


Figura 24. Gráfica de derivas sin aisladores para todos los casos de carga del silo F.

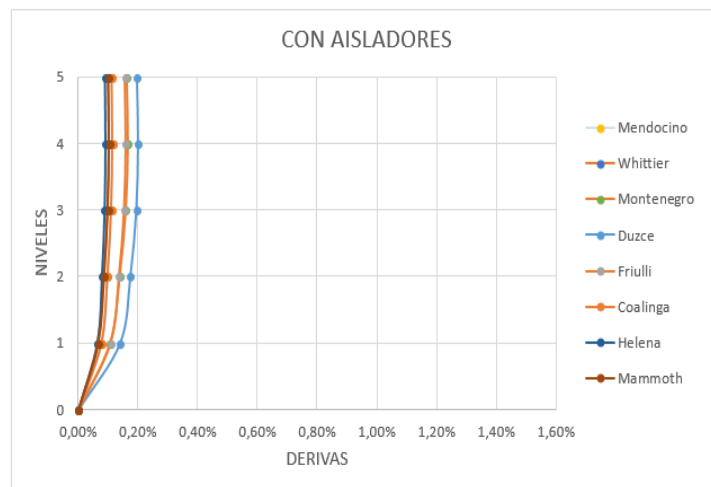


Figura 25. Gráfica de derivas con aisladores para todos los casos de carga del silo F.

Los anteriores resultados mostrados son solo para el silo F, se aclara que para los demás silos se realiza el mismo análisis.

### 4.1 Resultados promedio para cada silo

Para poder comparar correctamente la respuesta sísmica entre las relaciones altura-diámetro se promedian las derivas de todos los casos de carga y se obtiene un solo resultado para cada silo, a continuación, se muestran las gráficas obtenidas.

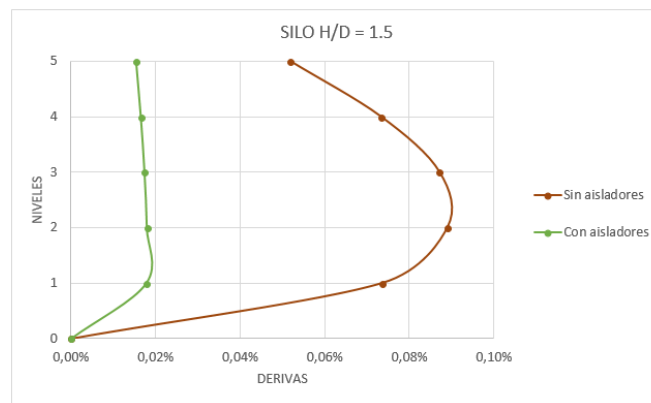


Figura 26. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo A.

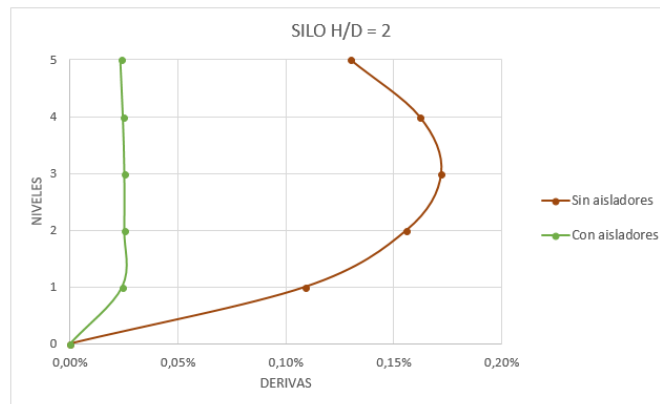


Figura 27. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo B.

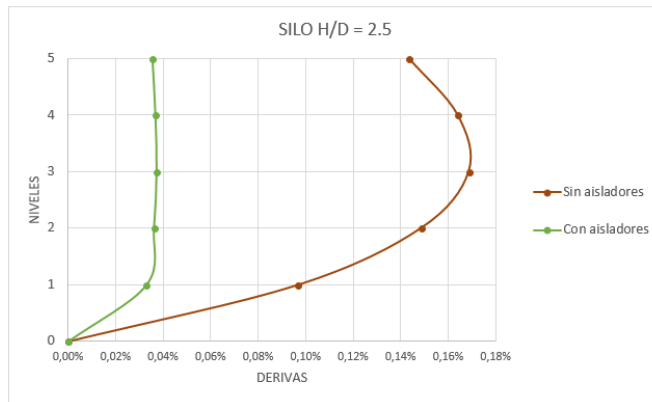


Figura 28. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo C.

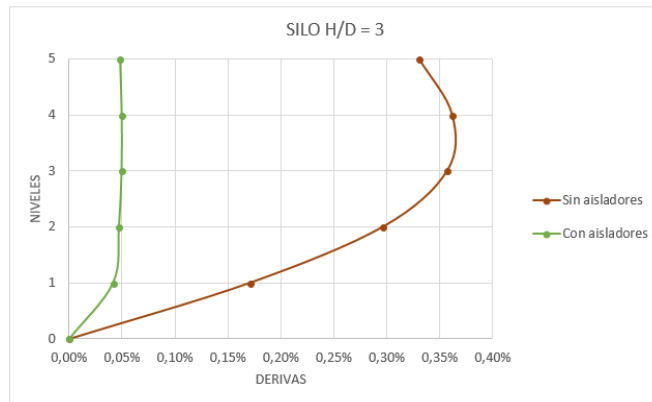


Figura 29. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo D.

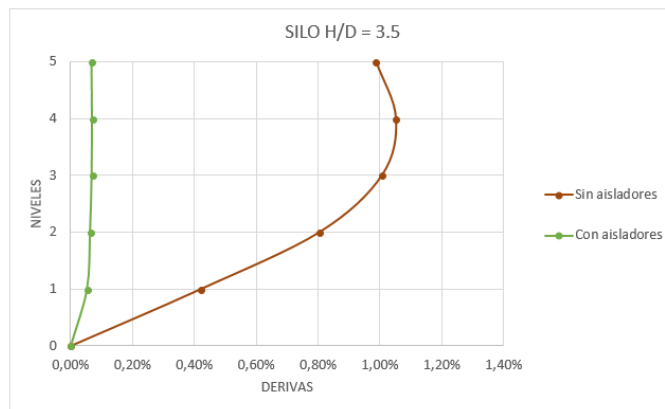


Figura 30. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo E.

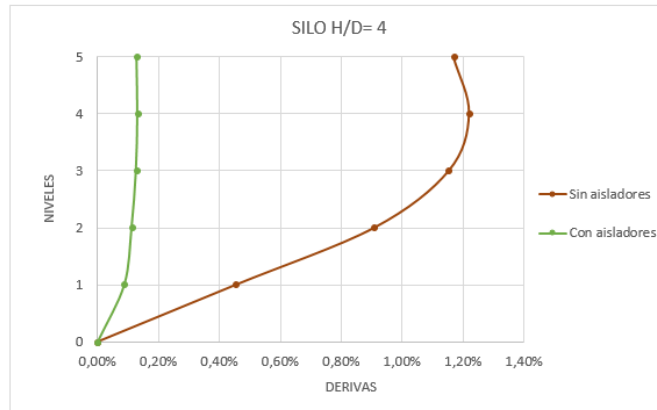


Figura 31. Gráfica comparación de derivas con y sin aislador para el silo F.

#### 4.2 Comparación de derivas para cada relación diámetro-altura

En las figuras 25 y 26 se procede a comparar cada silo y se puede observar que a medida que aumenta la relación diámetro-altura aumenta la curva de derivas para los dos casos (con y sin aisladores).

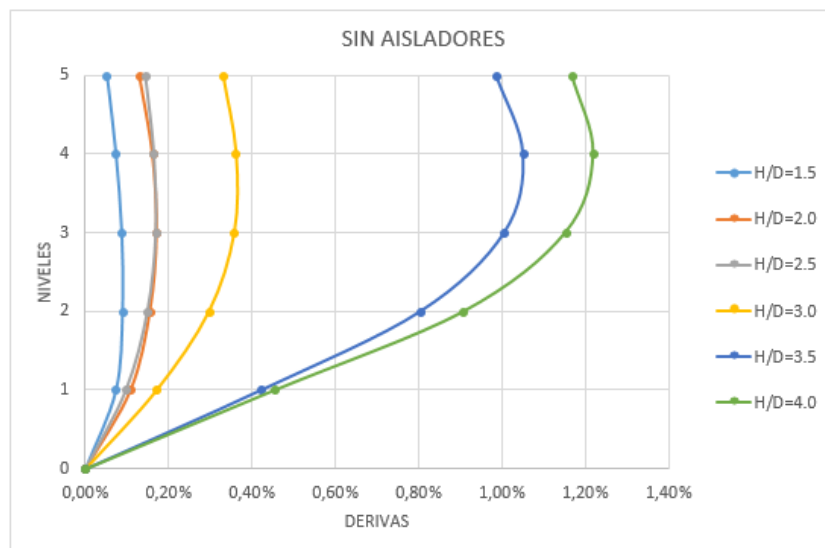


Figura 32. Gráfica comparativa de derivas para cada relación H/D sin aisladores.

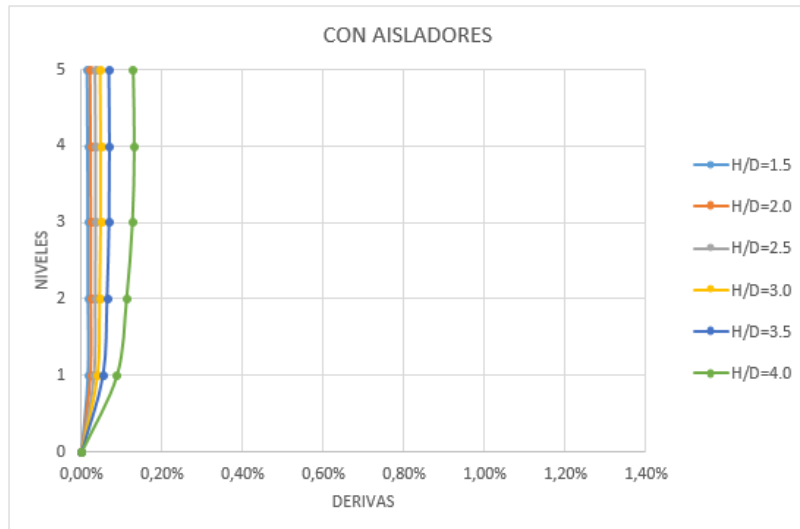


Figura 33. Gráfica comparativa de derivas para cada relación H/D con aisladores.

### 4.3 Comparación de las derivas para cada silo con y sin aisladores

En las tablas presentadas a continuación se muestra el valor de la deriva en porcentaje para cada silo y se hace la comparación con el sistema asilado y sin asilar, se puede observar que la eficiencia del uso de los aisladores supera el 80% en casi todos los casos con respecto a la evaluación de las derivas.

Tabla 7.  
Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo A.

| <b>H/D=1.5</b> |                       |                       |                   |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| <b>Nivel</b>   | <b>Sin aisladores</b> | <b>Con aisladores</b> | <b>Eficiencia</b> |
| <b>1</b>       | 0.0734%               | 0.0179%               | 76%               |
| <b>2</b>       | 0.0889%               | 0.0180%               | 80%               |
| <b>3</b>       | 0.0871%               | 0.0174%               | 80%               |
| <b>4</b>       | 0.0732%               | 0.0165%               | 77%               |
| <b>5</b>       | 0.0517%               | 0.0154%               | 70%               |

Tabla 8.  
Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo B.

**H/D=2.0**

| Nivel | Sin aisladores | Con aisladores | Eficiencia |
|-------|----------------|----------------|------------|
| 1     | 0.1089%        | 0.0243%        | 78%        |
| 2     | 0.1559%        | 0.0253%        | 84%        |
| 3     | 0.1719%        | 0.0254%        | 85%        |
| 4     | 0.1619%        | 0.0246%        | 85%        |
| 5     | 0.1300%        | 0.0235%        | 82%        |

Tabla 9.  
Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo C.

**H/D=2.5**

| Nivel | Sin aisladores | Con aisladores | Eficiencia |
|-------|----------------|----------------|------------|
| 1     | 0.0967%        | 0.0329%        | 66%        |
| 2     | 0.1484%        | 0.0360%        | 76%        |
| 3     | 0.1686%        | 0.0371%        | 78%        |
| 4     | 0.1639%        | 0.0366%        | 78%        |
| 5     | 0.1434%        | 0.0353%        | 75%        |

Tabla 10.  
Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo D.

**H/D=3.0**

| Nivel | Sin aisladores | Con aisladores | Eficiencia |
|-------|----------------|----------------|------------|
| 1     | 0.1704%        | 0.0414%        | 76%        |
| 2     | 0.2961%        | 0.0470%        | 84%        |
| 3     | 0.3569%        | 0.0495%        | 86%        |
| 4     | 0.3616%        | 0.0496%        | 86%        |
| 5     | 0.3301%        | 0.0481%        | 85%        |

Tabla 11.  
Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo E.

**H/D=3.5**

| Nivel | Sin aisladores | Con aisladores | Eficiencia |
|-------|----------------|----------------|------------|
| 1     | 0.4206%        | 0.0540%        | 87%        |
| 2     | 0.8038%        | 0.0641%        | 92%        |
| 3     | 1.0054%        | 0.0693%        | 93%        |
| 4     | 1.0505%        | 0.0704%        | 93%        |
| 5     | 0.9859%        | 0.0687%        | 93%        |

Tabla 12.  
Comparación de derivas con y sin aislamiento para el silo F.

**H/D=4.0**

| Nivel | Sin aisladores | Con aisladores | Eficiencia |
|-------|----------------|----------------|------------|
| 1     | 0.4538%        | 0.0882%        | 81%        |
| 2     | 0.9078%        | 0.1122%        | 88%        |
| 3     | 1.1527%        | 0.1268%        | 89%        |
| 4     | 1.2196%        | 0.1314%        | 89%        |
| 5     | 1.1685%        | 0.1287%        | 89%        |

#### 4.4 Comparación de los periodos de los silos aislados y sin aislar

En este ítem se verifica el incremento de los periodos fundamentales para cada silo como se describió en la metodología en el momento de implementar el aislador, en la tabla 13 se evidencia que se logra subir el periodo fundamental a lo estipulado en el diseño.

Tabla 13.  
Comparación de periodos con y sin aislamiento.

| Silo     | T sin aisladores [s] | T con aisladores [s] | Diferencia [s] |
|----------|----------------------|----------------------|----------------|
| <b>A</b> | 0.212168             | 2.634123             | 2.421955       |
| <b>B</b> | 0.279533             | 2.648892             | 2.369359       |
| <b>C</b> | 0.356877             | 2.672504             | 2.315627       |
| <b>D</b> | 0.443614             | 2.703983             | 2.260369       |
| <b>E</b> | 0.53877              | 2.742914             | 2.204144       |
| <b>F</b> | 0.641523             | 2.789467             | 2.147944       |

Al aumentar la relación H/D en los silos sin aislar el periodo también asciende como se puede observar en la figura 34.

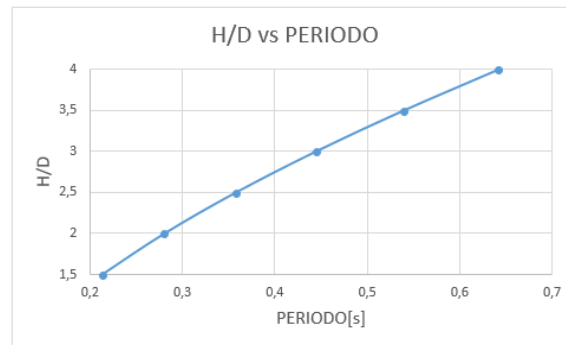


Figura 34. Gráfica de H/D vs periodo de los silos sin aislar.

#### 4.5 Verificación del comportamiento del aislador

Para hacer la verificación que el aislador implementado para los silos se comporta de manera adecuada es necesario verificar que el desplazamiento que sufre en la base este en el rango de fluencia estipulado por el catálogo según el aislador escogido. En este caso el desplazamiento de fluencia es de 8 mm y el máximo desplazamiento es de 150 mm y para un correcto funcionamiento del aislador el desplazamiento en la base debe estar en ese rango. En la tabla 14 se plasman los

datos de desplazamiento en la base para cada uno de los silos con el uso de aisladores y se puede observar que para cada caso el desplazamiento se encuentra en el rango anterior descrito.

Tabla 14.  
Desplazamiento en la base del aislador para cada silo.

| <b>Desplazamiento en la base del aislador</b> |         |            |
|---|---------|------------|
| <b>Silo</b>                                   | Metros  | Milímetros |
| <b>A</b>                                      | 0.07209 | 72.09      |
| <b>B</b>                                      | 0.07082 | 70.82      |
| <b>C</b>                                      | 0.06788 | 67.88      |
| <b>D</b>                                      | 0.06513 | 65.13      |
| <b>E</b>                                      | 0.06066 | 60.66      |
| <b>F</b>                                      | 0.04940 | 49.40      |

## 5. Conclusiones

Al implementar el uso de sistemas de control sísmico, como aisladores en la base, se obtiene en los silos un aumento considerable del periodo natural de la estructura, de manera que la aceleración experimentada durante el sismo disminuye, por lo cual, reduce las fuerzas cortantes. Esto debido a que el aislador reduce la entrada de energía al sistema provocada por el sismo ya que el aislador tiene la capacidad de trabajar en el rango inelástico para que así la estructura tenga menores sollicitaciones y derivas, esto se pudo comprobar dando cumplimiento al objetivo general de la tesis, comparando la respuesta de todos los silos estudiados, y en promedio la deriva bajo un 83% en todos los casos, aumentando el periodo de cada silo en 2.3 segundos en promedio como se muestra en la tabla 13.

En el momento de modelar los silos se tuvo en cuenta dejar constante la masa de cada silo, y al obtener los periodos fundamentales a cada relación H/D distinta sin asilar, se pudo observar que la relación H/D es proporcional al periodo y aumenta de manera aproximadamente lineal tal como se evidencia en la figura 27, de esto se puede inferir que el periodo también depende de la altura por que los factores masa y rigidez son constantes en todos los silos.

El uso de aisladores permite que el desplazamiento sea mayor en la base (nivel aislado), permitiendo que la superestructura tenga desplazamientos relativos bajos y permanezca dentro del rango elástico de deformación. Esto significa que en el momento del sismo toda la estructura desde su base tiene la misma vibración del suelo, en cambio, cuando se implementa el aislador solo la base de la estructura vibra de la misma manera que el suelo obteniendo un desplazamiento, pero estos desplazamientos se mantienen casi constantes en toda su altura, esto debido a que el silo se mueve como un bloque permitiendo que las derivas disminuyan.

Entre más cercano a uno sea el valor de la relación H/D mejor será el comportamiento sísmico de los silos, como se puede observar en las figuras 25 y 26, que muestra la gráfica de derivas sin aislamiento y con aislamiento para todas las relaciones H/D, en promedio se tienen una diferencia del 91% entre la relación más alta y la más baja. Por esta razón la relación con la mejor respuesta sísmica se obtuvo para  $H/D = 1.5$ , tanto con la implementación de aisladores como sin ellos, dando respuesta a los objetivos específicos planteado en la tesis.

### Referencias Bibliográficas

- Ahumada Villafaña, J. (2010). *Sistemas de control en Estructuras*. Barranquilla: Inge-CUC.
- Andrade, L., & Tuxworth, J. (2009). *Seismic protection of structures with modern base isolation technologies*. Green Leaf Engineers.
- Arriagada Rosas, J. A. (2005). *Aislación sísmica de un edificio de oficinas de siete pisos. (Análisis comparativo de comportamiento y costos con un edificio tradicional)*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Blog Proymec*. (10 de Mayo de 2014). Obtenido de <http://proymex.es/blog/tipos-de-silos-2/>
- Elías Chavéz, A. (2001). *Tres métodos para le análisis estructural de silos en concreto reforzado*. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Esperanza, M., & Cho, G. (2007). *Visión estructural de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Gómez, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2007). *Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas*. Cali: Dyna.
- Guillén Ascarza, M., & Rojas Pérez, A. (2017). *Análisis del comportamiento dinámico del agua en tanques apoyados rectangulares y cilindricos bajo acción sísmica*. Lima: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- Kanyilmaz, A., & Castiglioni, C. (2017). *Reducing the seismic vulnerability of existing elevated silos by means of base isolation devices*. Cyprus: Neapolis University Pafos.
- Manrique Horta, D., & Meza Rosas, J. (2016). *Evaluación técnica y de costos del uso de sistemas de control pasivo de respuesta sísmica en centros médicos*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Monfared, H., Shirvani, A., & Nwaubani, S. (2013). *An investigation into the seismic base isolation from practical perspective*. Essex: Andlia Riskin University.

Oviedo, J., & Duque, M. (2006). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. Medellín: Escuela de Ingeniería de Antioquia.

Oviedo, J., & Duque, M. (2009). *Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia*. Medellín: Escuela de Ingeniería de Antioquia.