

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL VIADUCTO LA FLORA



CÉSAR FERNANDO MAYORGA AMAYA



**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2011**

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL VIADUCTO LA FLORA

CÉSAR FERNANDO MAYORGA AMAYA

**Proyecto de grado en modalidad de investigación para optar el
título de Ingeniero Civil**

DIRECTOR

LEOCADIO RICO PADILLA

Ingeniero Civil

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

BUCARAMANGA

2011

Le agradezco a Dios por todo lo que me ha dado, por haberme permitido estudiar en la mejor universidad del mundo, por haberme dado la mejor familia de todas y rodéame de mis amigos.

Gracias a mi familia por todo el sacrificio y lo que me han aguantado durante este proceso.

A mi director, jefe y amigo porque sin él no estaría redactando y entregando este proyecto.

A José por todas las trashedas y madrugadas, por ser el mejor compañero de proyecto que puede existir y casi un hermano.

A Checho, Camii, Sonia, Sergio, Siju y Majo porque siempre estuvieron pendientes de mí y me ayudaron en cuanto podían y siempre me dieron su apoyo.

Y a todos aquellos que hicieron posible este proyecto...

GRACIAS!! 😊

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN. | 19 |
| 1.2. OBJETIVOS. | 20 |
| 1.2.1. Objetivo General: | 20 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos: | 20 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 21 |
| 2.1. ANÁLISIS MODAL | 22 |
| 2.2. ANÁLISIS MODAL-ESPECTRAL | 24 |
| 2.3. ANÁLISIS DE HISTORIAS EN EL TIEMPO | 26 |
| 3. MODELAMIENTO | 31 |
| 3.1. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS. | 31 |
| 3.2. MODELAMIENTO PROGRAMA PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS (SAP 2000). | 36 |
| 4. ANÁLISIS MODAL | 42 |
| 5. ANÁLISIS DINÁMICO | 46 |
| 5.1. ANÁLISIS DINÁMICO MODAL-ESPECTRAL. | 49 |
| 5.2. ANÁLISIS DE HISTORIAS EN EL TIEMPO. | 54 |
| 5.2.1. Coaligna: | 55 |
| 5.2.2. Duzce: | 59 |
| 5.2.3. Friuli: | 63 |

| | | |
|----------------------------------|------------------------------------|------------|
| 5.2.4. | Helena: | 67 |
| 5.2.5. | Loma Prieta: | 71 |
| 5.2.6. | Mamoth: | 75 |
| 5.2.7. | Monte Negro: | 79 |
| 5.2.8. | Pretolia: | 83 |
| 5.2.9. | Umbria: | 87 |
| 5.2.10. | Whittier: | 91 |
| 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS | | 96 |
| 6.1. DESPLAZAMIENTO | | 96 |
| 6.1.1. | Desplazamientos en la dirección x: | 96 |
| 6.1.2. | Desplazamientos en dirección y: | 98 |
| 6.2. CORTANTES EN LA BASE | | 99 |
| 6.2.1. | Sismos aplicados en dirección x: | 99 |
| 6.2.2. | Sismos aplicados en dirección y: | 101 |
| CONCLUSIONES | | 103 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 106 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Ilustración 1: Oscilador simple sujeto a movimiento de apoyo. | 21 |
| Ilustración 2: Viaducto Armando Puyana Puyana o La Flora. | 31 |
| Ilustración 3: Vista lateral del viaducto La Flora. | 32 |
| Ilustración 4: Dimensiones laterales del viaducto. | 32 |
| Ilustración 5: Pilas de apoyo. | 34 |
| Ilustración 6: Detalle viga cabezal. | 34 |
| Ilustración 7: (1) Sección de la viga en la luz. (2) Sección transversal de la viga en los apoyos. | 35 |
| Ilustración 8: Vigas postensadas apoyadas sobre la viga cabezal. | 36 |
| Ilustración 9: Ventana Material Property Data (SAP 2000). | 37 |
| Ilustración 10: Sección Viga I simetría sencilla. | 38 |
| Ilustración 11: Viga Cabezal. | 39 |
| Ilustración 12: Definición sección de la viga cabezal (SAP 2000) | 39 |
| Ilustración 13: Definición sección prismática viga cabezal (SAP 2000) | 40 |
| Ilustración 14: Definición sección pilas (SAP 2000) | 41 |
| Ilustración 15: Modelo tridimensional del viaducto La Flora (SAP 2000) | 41 |
| Ilustración 16: Detalles caso modal de análisis (SAP 2000) | 42 |
| Ilustración 17: Primera forma modal (SAP 2000) | 43 |
| Ilustración 18: Segunda forma modal (SAP 2000) | 43 |
| Ilustración 19: Tercer forma modal (SAP 2000) | 44 |
| Ilustración 20: Cuarta forma modal (SAP 2000) | 44 |
| Ilustración 21: Espectro de respuesta para puentes de Bucaramanga. | 46 |
| Ilustración 22: Grupo de acelerogramas compatibles con la falla Bucaramanga-Santa Marta. | 47 |
| Ilustración 23: Grupo de acelerogramas compatibles con la falla Frontal de los Llanos Orientales. | 48 |
| Ilustración 24: Acelerograma de Coaligna (SAP 2000) | 48 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 25: Definición del sismo en dirección X (SAP 2000) | 49 |
| Ilustración 26: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo en dirección x. | 50 |
| Ilustración 27: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo en dirección y. | 50 |
| Ilustración 28: Definición para cada caso de sismo (SAP 2000) | 54 |
| Ilustración 29: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección x (SAP 2000). | 55 |
| Ilustración 30: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección y (SAP 2000). | 55 |
| Ilustración 31: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección x. | 56 |
| Ilustración 32: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección x. | 56 |
| Ilustración 33: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección y. | 57 |
| Ilustración 34: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección y. | 57 |
| Ilustración 35: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Coaligna en dirección x. | 58 |
| Ilustración 36: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Coaligna en dirección y. | 58 |
| Ilustración 37: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Duzce aplicado en dirección x (SAP 2000). | 59 |
| Ilustración 38: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Duzce aplicado en dirección y (SAP 2000). | 59 |
| Ilustración 39: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección x. | 60 |
| Ilustración 40: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección x. | 60 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 41:Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección y. | 61 |
| Ilustración 42:Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección y. | 61 |
| Ilustración 43: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Duzce en dirección x. | 62 |
| Ilustración 44: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Duzce en dirección y. | 62 |
| Ilustración 45: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Friuli aplicado en dirección x (SAP 2000). | 63 |
| Ilustración 46:Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Friuli aplicado en dirección y (SAP 2000). | 63 |
| Ilustración 47: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección x. | 64 |
| Ilustración 48: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección x. | 64 |
| Ilustración 49:Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección y. | 65 |
| Ilustración 50:Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección y. | 65 |
| Ilustración 51: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Friuli en dirección x. | 66 |
| Ilustración 52: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Friuli en dirección y. | 66 |
| Ilustración 53:Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Helena aplicado en dirección x (SAP 2000). | 67 |
| Ilustración 54:Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Helena aplicado en dirección y (SAP 2000). | 67 |
| Ilustración 55: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección x. | 68 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 56: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección x. | 68 |
| Ilustración 57: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección y. | 69 |
| Ilustración 58: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección y. | 69 |
| Ilustración 59: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Helena en dirección x | 70 |
| Ilustración 60: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Helena en dirección y. | 70 |
| Ilustración 61: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección x (SAP 2000). | 71 |
| Ilustración 62: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección y (SAP 2000). | 71 |
| Ilustración 63: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección x. | 72 |
| Ilustración 64: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección x. | 72 |
| Ilustración 65: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección y. | 73 |
| Ilustración 66: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección y. | 73 |
| Ilustración 67: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Loma Prieta en dirección x. | 74 |
| Ilustración 68: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Loma Prieta en dirección y. | 74 |
| Ilustración 69: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección x (SAP 2000). | 75 |
| Ilustración 70: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección y (SAP 2000). | 75 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 71: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección x. | 76 |
| Ilustración 72: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección x. | 76 |
| Ilustración 73: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección y. | 77 |
| Ilustración 74: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección y. | 77 |
| Ilustración 75: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Mammoth en dirección x. | 78 |
| Ilustración 76: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Mammoth en dirección y. | 78 |
| Ilustración 77: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección x (SAP 2000). | 79 |
| Ilustración 78: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección y (SAP 2000). | 79 |
| Ilustración 79: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección x. | 80 |
| Ilustración 80: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección x. | 80 |
| Ilustración 81: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección y. | 81 |
| Ilustración 82: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección y. | 81 |
| Ilustración 83: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Monte Negro en dirección x. | 82 |
| Ilustración 84: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Monte Negro en dirección y. | 82 |
| Ilustración 85: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección x (SAP 2000). | 83 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 86:Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección y (SAP 2000). | 83 |
| Ilustración 87: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección x. | 84 |
| Ilustración 88: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección x. | 84 |
| Ilustración 89:Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección y. | 85 |
| Ilustración 90: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección y. | 85 |
| Ilustración 91: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Pretolia en dirección x. | 86 |
| Ilustración 92: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Pretolia en dirección y. | 86 |
| Ilustración 93:Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Umbria aplicado en dirección x (SAP 2000). | 87 |
| Ilustración 94:Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Umbria aplicado en dirección y (SAP 2000). | 87 |
| Ilustración 95: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección x. | 88 |
| Ilustración 96: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección x. | 88 |
| Ilustración 97: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección y. | 89 |
| Ilustración 98: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección y. | 89 |
| Ilustración 99: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Umbria en dirección x. | 90 |
| Ilustración 100: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Umbria en dirección y. | 90 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 101: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Whittier aplicado en dirección x (SAP 2000). | 91 |
| Ilustración 102: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y (SAP 2000). | 91 |
| Ilustración 103: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección x. | 92 |
| Ilustración 104: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y. | 92 |
| Ilustración 105: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y. | 93 |
| Ilustración 106: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y. | 93 |
| Ilustración 107: Gráfica comportamiento del cortante en la base de la pila 1 bajo acción del sismo Whittier en dirección x. | 94 |
| Ilustración 108: Gráfica comportamiento del cortante en la base de la pila 1 bajo acción del sismo Whittier en dirección y. | 94 |
| Ilustración 109: Gráfica resultados de desplazamientos de los casos estudiados en dirección x. | 96 |
| Ilustración 110: Gráfica resultados de desplazamientos de los casos estudiados en dirección y. | 98 |
| Ilustración 111: Cortantes en la base en cada una de las pilas bajo acción de cada uno de los análisis dinámicos en dirección x. | 99 |
| Ilustración 112: Cortantes en la base en cada una de las pilas bajo acción de cada uno de los análisis dinámicos en dirección y. | 101 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Dimensiones zapatas. | 33 |
| Tabla 2: Periodos y frecuencias para los 54 modos de vibración (SAP 2000) | 45 |
| Tabla 3: Aceleraciones para cada uno de los modos de vibración producidos por el sismo en dirección x. | 51 |
| Tabla 4: Aceleraciones para cada uno de los modos de vibración producidos por el sismo en dirección y. | 52 |
| Tabla 5: Reacciones en la base producidos por los sismos en x y y. | 53 |
| Tabla 6: Valores de las cortantes en las bases del Viaducto La Flora para los diferentes sismos aplicados en dirección x. | 95 |
| Tabla 7: Valores de las cortantes en las bases del Viaducto La Flora para los diferentes sismos aplicados en dirección x. | 95 |

TABLA DE ECUACIONES

| | |
|---|----|
| Ecuación 1: Ecuación básica de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad para un sismo. | 23 |
| Ecuación 2: Ecuación básica de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad para un sismo transformada. | 23 |
| Ecuación 3: Ecuación para el enésimo modo de vibración. | 23 |
| Ecuación 4: Ecuación descomposición modal. | 24 |
| Ecuación 5: Ecuación 4 reemplazada en la ecuación general de movimiento. | 24 |
| Ecuación 6: Resultado multiplicar la ecuación 5 por el Valor M_i . | 25 |
| Ecuación 7: Ecuación resultado despeje. | 25 |
| Ecuación 8: Factor de participación modal del modo i . | 25 |
| Ecuación 9: Valor de la coordenada modal. | 25 |
| Ecuación 10: Desplazamientos relativos máximos. | 26 |
| Ecuación 11: Ecuación de movimiento para un instante $i+1$. | 27 |
| Ecuación 12: Vector de cargas efectiva. | 27 |
| Ecuación 13: Carga efectiva para el enésimo modo. | 27 |
| Ecuación 14: Expresión de respuesta a un sismo para un enésimo modo de un sistema de varios grados de libertad. | 28 |
| Ecuación 15: Expresión derivada de la integral de Duhamel. | 28 |
| Ecuación 16: Integral de Duhamel. | 28 |
| Ecuación 17: Ecuación para el desplazamiento completo de la estructura. | 29 |
| Ecuación 18: Fuerzas sísmicas resultantes. | 29 |
| Ecuación 19: Aceleración en la estructura. | 29 |
| Ecuación 20: Fuerza sísmica efectiva. | 29 |
| Ecuación 21: Fuerza sísmica total obtenida. | 30 |
| Ecuación 22: Cortante en la base. | 30 |

RESUMEN

TITULO:

“CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL VIADUCTO LA FLORA”**

AUTOR:

MAYORGA AMAYA, César Fernando**

PALABRAS CLAVES:

Análisis Modal, Análisis Modal-Espectral, Análisis de Historias en el Tiempo, Desplazamientos, Modelamiento, Parámetros Geométricos, Reacciones.

CONTENIDO

El presente proyecto contiene el estudio realizado a la superestructura del Viaducto La Flora o Armando Puyana Puyana, con el cual se busca analizar el comportamiento del puente utilizando diferentes análisis tanto estáticos como dinámicos.

En el primer capítulo se realiza el planteamiento del problema lo que conlleva a la formulación de los objetivos a desarrollar durante todo el proceso. En el segundo se muestra un corto recuento de la información teórica necesaria para conocer como la herramienta electrónica SAP 2000, sin la cual este proyecto no podría llevarse a cabo, realizará todos los análisis utilizando diferentes ecuaciones diferenciales y métodos numéricos.

A partir de la información recolectada en la primera parte del proyecto y datos obtenidos de la diferente bibliografía se generó un modelo utilizando elementos tipo frame en el programa SAP 2000, sobre el cual se corrieron los tres diferentes tipos de análisis.

Se llevaron a cabo tres tipos de análisis, un Análisis Modal con el cual se encontraron los diferentes modos de vibración con su correspondiente periodo y participaciones de masa, un Análisis Modal-Espectral en el cual utilizando el espectro para la ciudad de Bucaramanga propuesto por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, del cual se obtuvieron los desplazamientos y reacciones para cada una de las pilas de la estructura.

El último análisis consiste en un Análisis de Historias en el Tiempo o Cronológico el cual utilizando una serie de acelerogramas propuestos por INGEOMINAS se encuentran diferentes reacciones de la estructura ante estos registros de sismos, Para finalizar se generaron una serie de comparaciones y conclusiones.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas - Escuela de Ingeniería Civil – Director Leocadio RICO PRADILLA.

ABSTRACT

TITLE:

“DYNAMIC CHARACTERIZATION OF THE FLORA VIADUCT.” *

AUTHOR:

MAYORGA AMAYA, César Fernando**

KEYWORDS:

Displacements, Geometric Parameters, Modal Analysis, Modal-Spectral Analysis, Modeling, Reactions Time History Analysis.

CONTENT

This project includes the study of the behavior of the viaduct La Flora or Armando Puyana Puyana's superstructure under static and dynamic analysis. First chapter makes an approach to the problem which involves the exposition of the objectives to develop throughout the process.

The second features a short account of the theoretical information necessary for the electronic tool known as SAP 2000, which made possible this project, perform all tests using various differential equations and numerical methods.

From the information collected in the first part of the project and different data for the literature generated a frame model using standard elements in the SAP 2000, which ran on three different types of analysis were carried out. A modal analysis which found different modes of vibration with the corresponding period and mass participation, a Modal-spectral Analysis in which using the spectrum for the city of Bucaramanga proposed by Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, which were obtained displacements and reactions to each of the piers of the structure.

The last analysis is a Time History or Chronological analysis which using a series of accelerograms given by INGEOMINAS producing different reactions on the structure, finally it's shown a series of comparisons and conclusions.

* Graduate thesis

** Faculty of Mechanical Engineering Physics - School of Civil Engineering - Chief Engineer Leocadio Rico Pradilla.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

Los puentes son una de las obras de construcción más ingeniosas que se han llevado a cabo a lo largo de la historia, gracias a éstos facilitamos de manera asombrosa la movilidad en los trayectos de terrestres que comunican diferentes poblaciones, mejorando el comercio y sus relaciones diplomáticas. Es por esto que es de vital importancia mantenerlos a salvo de posibles riesgos que puedan afectar este balance que se ha logrado.

El viaducto La Flora es uno de los más importantes corredores viales con los que cuenta la ciudad de Bucaramanga, éste cuenta con 298.3 metros de longitud y descansa sobre 8 pilares y 2 estribos. Conecta de manera ágil y rápida la meseta con todo el sector sur del área metropolitana, por lo cual es de gran importancia en la vida cotidiana de los habitantes de la ciudad.

Este proyecto busca analizar la estructura del viaducto de una manera detallada, teniendo en cuenta datos y hechos sísmicos reales, para poder predecir y entender comportamiento ante un evento similar con fines académicos.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. Objetivo General:

Caracterizar dinámicamente el viaducto La Flora.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Definir los parámetros geométricos del viaducto La Flora, requeridos para su caracterización dinámica.
- Encontrar los diferentes modos de vibración del viaducto La Flora.
- Realizar un análisis estático lineal del viaducto La Flora.
- Realizar un análisis dinámico modal-espectral del viaducto La Flora.
- Realizar un análisis de historias en el tiempo, con los sismos obtenidos de la microzonificación sísmica de la meseta de Bucaramanga.

2. MARCO TEÓRICO

El objetivo principal de un análisis estructural es evaluar el comportamiento estructural bajo varias cargas y suministrar información importante tal como las fuerzas, momentos y deformaciones. Puede clasificarse como dinámico o estático: el análisis estático es aquel que trata con las cargas que no se ven afectadas por el paso del tiempo, mientras que el análisis dinámico considera cualquier cara en la que la magnitud, dirección y posición varíe con el tiempo.

Un sismo es un movimiento natural de tierra causado por varios fenómenos, incluyendo procesos de movimiento tectónico global, deslizamientos, explosiones, etc. Los movimientos tectónicos causan modificaciones en la corteza terrestre constantemente, los cuales con llevan a los terremotos. [INGEOMINAS, 2001]

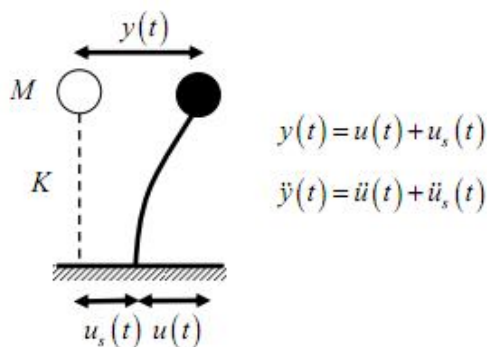


Ilustración 1: Oscilador simple sujeto a movimiento de apoyo.

Desde el punto de vista estructural, la característica más importante son la aceleración pico, la duración y la frecuencia. La aceleración pico es la máxima aceleración y representa la intensidad del sismo. Un sismo de gran intensidad y

larga duración tiene mayor posibilidad de llevar los materiales de una estructura al rango inelástico.

El análisis estático lineal considera que una fuerza estática horizontal equivalente aplicada a un elemento individual a lo largo de la estructura. La fuerza horizontal equivalente está basada en un periodo natural de un grado de libertad.

El análisis modal espectral o método de la respuesta espectral, es un método que permite estimar los desplazamientos y fuerzas en los elementos de un elemento estructural. Éste implica el cálculo solamente de los valores máximos de los desplazamientos y aceleraciones en cada modo usando un espectro de diseño, el mismo que representa el promedio o la envolvente de espectros de respuesta para diversos sismos, con algunas consideraciones adicionales expuestas en los códigos de diseño.

El método de historias en el tiempo es una integración numérica paso a paso de las ecuaciones de movimiento. Usualmente es empleada para puentes geoméricamente complejos críticos o importantes. Un análisis inelástico provee una medición más realista del comportamiento de la estructura cuando se compara un análisis inelástico.

2.1. ANÁLISIS MODAL

La ecuación básica de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad para un sismo está dada por la siguiente ecuación:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{B\}\ddot{u}_g$$

Ecuación 1: Ecuación básica de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad para un sismo.

El desplazamiento esta primero expresada en términos de modos naturales, y después es multiplicado por la matriz transformada del modo natural para obtener la siguiente expresión:

$$[M^*]\{\ddot{Y}\} + [C^*]\{\dot{Y}\} + [K]\{Y\} = -[\phi]^T[M]\{B\}\ddot{u}_g$$

Ecuación 2: Ecuación básica de movimiento de un sistema de múltiples grados de libertad para un sismo transformada.

Y la ecuación para el enésimo modo está dada por:

$$M_n^* \ddot{Y}_n + 2\xi \omega_n M_n^* \dot{Y}_n + \omega_n^2 M_n^* Y_n = L_n \ddot{u}_g$$

Ecuación 3: Ecuación para el enésimo modo de vibración.

Dónde:

$$M_n^* = \{\phi\}^T [M] \{\phi_n\} \quad \text{Y} \quad L_n = -[\phi]^T [M] [B]$$

Esta aproximación se refiere algunas veces al clásico método de superposición de modos. Similar a la estimación del desplazamiento total, las fuerzas del elemento pueden ser estimadas también adicionando al elemento fuerzas para cada modo.

2.2. ANÁLISIS MODAL-ESPECTRAL

El método modal espectral requiere como dato de partida para su aplicación conocer los modos y frecuencias naturales del sistema de múltiples grados de libertad, es decir que se conocer los valores de frecuencias w_i y de los modos ϕ_i . Se propone la descomposición modal de la forma:

$$u(t) = \sum_{i=1}^N q_i(t) \cdot [\phi]_i$$

Ecuación 4: Ecuación descomposición modal.

Dónde $q_i(t)$ es el “desplazamiento generalizado” del modo i.

Reemplazando la anterior ecuación en la ecuación general de movimiento y multiplicando ambos miembros de la ecuación por la transpuesta del vector ϕ_i , que representa los desplazamientos modales del modo i, se obtiene la expresión de la ecuación de equilibrio dinámico del modo i en la forma:

$$[\phi]_i^T [\phi]_i [K] q_i(t) + [\phi]_i^T [M] [\phi]_i \ddot{q}_i(t) + [\phi]_i^T [C] [\phi]_i \dot{q}_i(t) = - [M] [\phi]_i^T \{B\} \ddot{u}_g(t)$$

Ecuación 5: Ecuación 4 reemplazada en la ecuación general de movimiento.

Definiendo la notación: $\bar{K}_i = [\phi]_i^T [\phi]_i [K]$, $\bar{M}_i = [\phi]_i^T [\phi]_i [M]$ y $\bar{C}_i = [\phi]_i^T [\phi]_i [C]$. Dividiendo a mos miembros de la ecuación 5 por \bar{M}_i , se obtiene:

$$\omega_i^2 q_i(t) + \ddot{q}_i(t) + 2 \omega_i \xi_i \dot{q}_i(t) = -\ddot{u}_g(t) ([M][\phi]_i^T \{B\}) / \bar{M}_i$$

Ecuación 6: Resultado multiplicar la ecuación 5 por el Valor \bar{M}_i .

Comparando la ecuación 9 con la correspondiente excitación sísmica del sistema.

$$\omega_i^2 u(t) + \ddot{u}(t) + 2 \omega \xi \dot{u}(t) = -\ddot{u}_g(t)$$

Ecuación 7: Ecuación resultado despeje.

De las anteriores expresiones presentan una correspondencia directa en todos sus términos en los respectivos valores de $q(t)$ y de $u(t)$, salvo por el factor $[M][\phi]_i^T \{B\} / \bar{M}_i$ que aparece en la ecuación 6, este factor se expresa:

$$\Gamma = [M][\phi]_i^T \{B\} / \bar{M}_i$$

Ecuación 8: Factor de participación modal del modo i.

De este análisis surge que si se conoce el desplazamiento máximo que ocurre en el sistema de un grado de libertad, denominado como S_d , es el valor máximo de la coordenada modal respectiva $q_i(t)$, $q_{i \max}$, será:

$$q_{i \max} = \Gamma_i \cdot S_d$$

Ecuación 9: Valor de la coordenada modal.

Por lo tanto, los desplazamientos relativos máximos asociados con el modo i están dados por la expresión:

$$[U]_{i \max} = q_{i \max} \cdot [\phi]_i = \Gamma_i \cdot S_d \cdot [\phi]_i$$

Ecuación 10: Desplazamientos relativos máximos.

De manera similar, el vector pseudo-aceleración debido al modo i , resulta:

$$[\ddot{U}]_{i \max}^s = \ddot{q}_{i \max} \cdot [\phi]_i = \Gamma_i \cdot S_a \cdot [\phi]_i$$

2.3. ANÁLISIS DE HISTORIAS EN EL TIEMPO

Cuando una estructura entra en el rango no lineal, o tienen propiedades de amortiguamiento poco usuales, el análisis modal no puede ser usado. Un método de integración directa debe ser usado para conseguir respuestas más precisas sobre la estructura.

En un análisis de historias en el tiempo, el periodo de tiempo está dividido en pequeños pasos, d_τ . Ahora si para un instante i del intervalo ya ha sido determinada la respuesta de la estructura y denotada como u_i, \dot{u}_i y \ddot{u}_i . Así la respuesta del sistema en ese instante de tiempo i satisface la ecuación de movimiento. Este método de pasos de tiempo permite ir un paso más allá y determinar la respuesta u_{i+1}, \dot{u}_{i+1} y \ddot{u}_{i+1} para el instante $i + 1$ del intervalo de tiempo satisfaciendo la ecuación de movimiento. Así, la ecuación de movimiento para ese instante se representaría de la siguiente forma:

$$[M]\{\ddot{u}_{i+1}\} + [C]\{\dot{u}_{i+1}\} + [K]\{u_{i+1}\} = - [M]\{\ddot{u}_{gi+1}\}$$

Ecuación 11: Ecuación de movimiento para un instante $i+1$.

El análisis de historias en el tiempo aplicado a un caso de un sistema de un grado de libertad, para análisis de sismos la fuerza que depende del tiempo debe ser remplazada con cargas efectivas, que están dadas por el producto de la masas en cualquier nivel, M , y la aceleración del suelo $g(t)$. El vector de cargas efectivas se obtiene del producto de la matriz de masa y la aceleración del suelo:

$$P_e(t) = \{\Gamma\}[M]\ddot{g}(t)$$

Ecuación 12: Vector de cargas efectiva.

Dónde $\{\Gamma\}$ es el vector de coeficientes de influencia en el que la componente i representa la aceleración para el desplazamiento con coordenada i gracias a la aceleración del suelo en la base. Para un modelo estructural en el que los grados de libertad están representados por desplazamientos horizontales de los pisos, el vector $\{\Gamma\}$ se convierte en un vector unitario $\{1\}$, ya que para una aceleración del suelo unitaria en dirección horizontal todos los grados de libertad tienen una aceleración horizontal unitaria. La carga efectiva en el n ésimo modo está dada por:

$$P_n = \{\phi_n\}^T [M] \{\Gamma\} g(t)$$

Ecuación 13: Carga efectiva para el n ésimo modo.

Así obtenemos la expresión para la respuesta sísmica del enésimo modo de un sistema de varios grados de libertad:

$$\ddot{Y}_n + 2\lambda_n\omega_n\dot{Y}_n + \omega_n^2 Y_n = \varphi_n \ddot{g}(t)/M_n^*$$

Ecuación 14: Expresión de respuesta a un sismo para un enésimo modo de un sistema de varios grados de libertad.

De forma similar a la usada en un sistema de un solo grado de libertad, la respuesta de este modo en cualquier instante de tiempo t puede ser obtenido usando la integral de Duhamel:

$$Y_n(t) = \frac{\varphi_n V_n(t)}{M_n^* \omega_n}$$

Ecuación 15: Expresión derivada de la integral de Duhamel.

Donde $V_n(t)$ representa la integral

$$V_n(t) = \int_0^t \ddot{g}(\tau) e^{-\lambda_n \omega_n (1-\tau)} \sin \omega_n (t - \tau) d\tau$$

Ecuación 16: Integral de Duhamel.

El desplazamiento completo de la estructura en cualquier instante de tiempo es obtenido por superposición de las contribuciones individuales de los modos:

$$\{v(t)\} = \sum_{n=1}^N \{\phi_n\} Y_n(t) = [\Phi]\{Y(t)\}$$

Ecuación 17: Ecuación para el desplazamiento completo de la estructura.

Las fuerzas sísmicas resultantes pueden ser determinadas en términos de aceleraciones efectivas, para cada nodo está dada por el producto de la frecuencia circular y la amplitud de desplazamientos de la coordenada generalizada:

$$\ddot{Y}_{ne}(t) = \omega_n^2 Y_n(t) = \frac{\varphi_n \omega_n V_n(t)}{M_n^*}$$

Ecuación 18: Fuerzas sísmicas resultantes.

La aceleración correspondiente en la estructura gracias al enésimo modo está dado por:

$$\{\ddot{v}_{ne}(t)\} = \{\phi_n\} \ddot{Y}_{ne}(t)$$

Ecuación 19: Aceleración en la estructura.

Y fuerza sísmica efectiva correspondiente esta dada por:

$$\{q_n(t)\} = [M]\ddot{v}_n(t) = [M]\{\phi_n\} \omega_n \varphi_n V_n(t) / M_n^*$$

Ecuación 20: Fuerza sísmica efectiva.

La fuerza sísmica total es obtenida por superposición de las fuerzas modales individuales para obtener

$$q(t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) = [M][\Phi]\omega^2 Y(t)$$

Ecuación 21: Fuerza sísmica total obtenida.

El cortante en la base puede ser obtenido sumando las fuerzas sísmicas efectivas sobre la masa efectiva de la estructura:

$$Q_n(t) = \sum_{i=1}^N q_{in}(t) = \{1\}^T \{q_n(t)\} = \frac{L_n^2}{M_n^*} \omega_n V_n(t)$$

Ecuación 22: Cortante en la base.

3. MODELAMIENTO

3.1. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.

El viaducto Armando PuyanaPuyana o La Flora es una de las soluciones viales que tiene la ciudad de Bucaramanga para sobrellevar la congestión causada por el flujo vehicular en las horas pico de los ciudadanos desplazándose desde el sector oriental de la meseta hacia el sur del área metropolitana (Floridablanca y Piedecuesta).



Ilustración 2: Viaducto Armando PuyanaPuyana o La Flora.

Fuente: El Autor.



Ilustración 3: Vista lateral del viaducto La Flora.

Fuente: El Autor

Este proyecto consiste en una estructura de 298.3 metros de luz libre entre estribos, 25 metros de ancho del tablero de tres carriles para cada sentido de tráfico, andén peatonal a cada lado y separador, apoyados en ocho pilares de dos estribos.



Ilustración 4: Dimensiones laterales del viaducto.

La cimentación de esta estructura, se encuentra conformada por un par de zapatas aisladas en cada eje de cimentación con dimensión promedio de 7.5 y 7.0

metros y altura promedio de 2.5 metros. A continuación se presenta el listado detallado de las dimensiones de las zapatas:

Tabla 1: Dimensiones zapatas.

| EJE | ALTO PILA | DIMENSIONES DE LA ZAPATAS | | | |
|-----|-----------|---------------------------|------|------|------|
| | H(m) | B | L | h | h' |
| 1 | 22.51 | 8.00 | 7.00 | 2.50 | 1.30 |
| 2 | 36.25 | 9.50 | 7.50 | 2.75 | 1.50 |
| 3 | 43.04 | 10.50 | 7.50 | 3.00 | 1.60 |
| 4 | 44.00 | 10.50 | 7.50 | 3.00 | 1.60 |
| 5 | 42.00 | 10.00 | 7.50 | 3.00 | 1.60 |
| 6 | 26.50 | 8.00 | 7.00 | 2.50 | 1.30 |
| 7 | 16.75 | 7.00 | 6.00 | 1.75 | 1.00 |
| 8 | 13.75 | 7.00 | 6.00 | 1.75 | 1.00 |

La estructura de apoyo se erige en cada eje con un par de pilas conformadas por estructuras huecas rectangulares de 3 por 3 metros y espesor de 0.25 metros, con altura variable entre 15.87 y 46.12 metros y rematadas en una viga cabezal tipo cajón de 23.5 por 3 metros y 2 metros de altura.



Ilustración 5: Pilas de apoyo.

Fuente: El Autor.

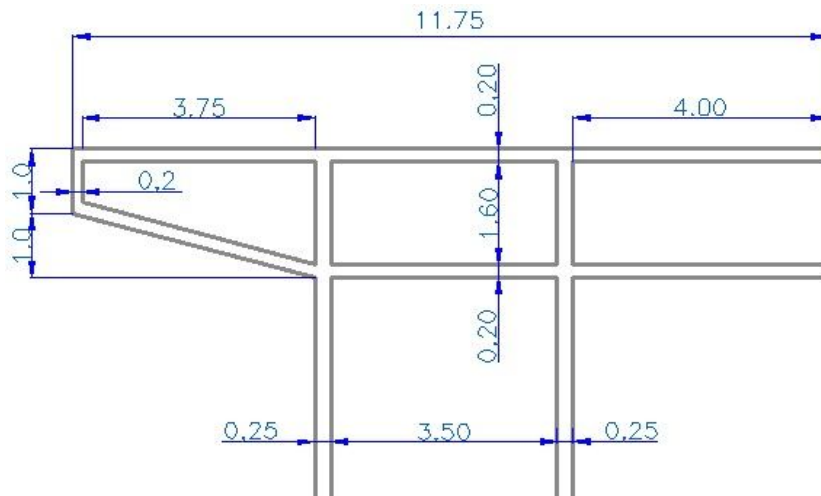


Ilustración 6: Detalle viga cabezal.

La estructura está conformada por 91 vigas postensadas de 1.63 metros de altura, 0.47 metros de base, 0.67 metros de cabeza y alma de 0.21 metros, con longitud variable entre los 26.3 metros y los 36 metros distribuidas en 9 luces en grupos de

10 excepto en la octava luz, donde debido a su longitud tiene 11. El tablero conformado por 940 plaquetas de 1.69 por 0.4 metros y 0.06 de espesor para un espesor total de placa de 0.17 metros, capa de rodadura en pavimento flexible, demarcación e iluminación.

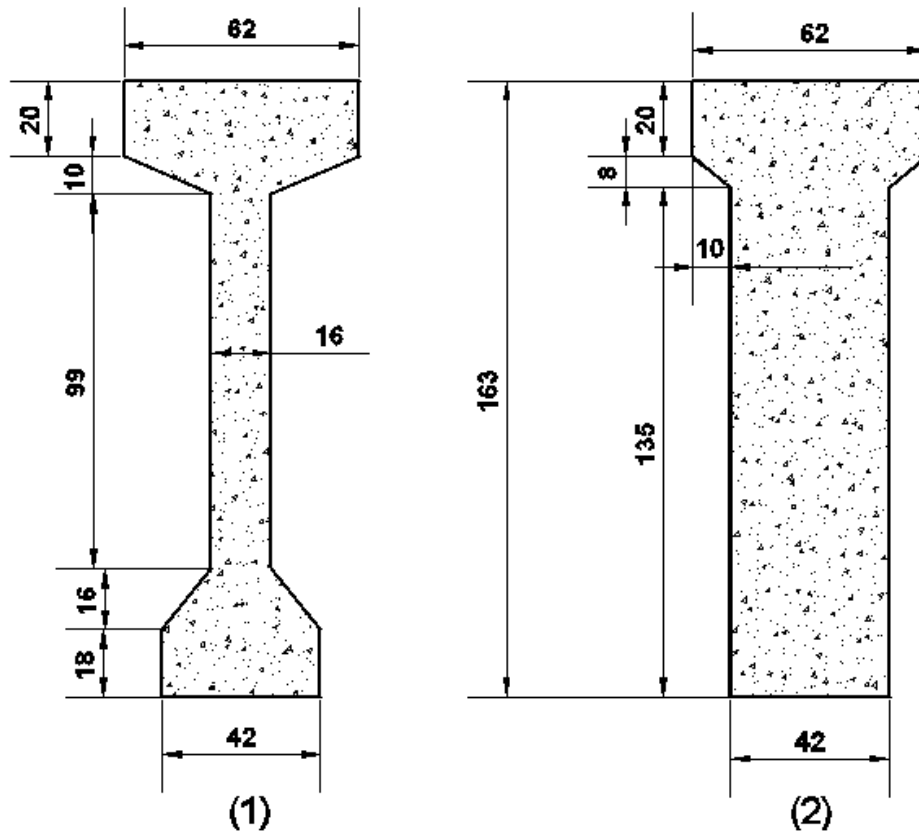


Ilustración 7: (1) Sección de la viga en la luz. (2) Sección transversal de la viga en los apoyos.



Ilustración 8: Vigas postensadas apoyadas sobre la viga cabezal.

Fuente: El Autor.

3.2. MODELAMIENTO PROGRAMA PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS (SAP 2000).

Para poder llevar a cabo los respectivos análisis de la estructura usaremos la herramienta electrónica SAP 2000, con la cual hallaremos su periodo y demás datos necesarios para poder cumplir con los objetivos planteados en este proyecto.

Para comenzar se define el tipo de material utilizado, siendo este un concreto de resistencia 28 [MPa] en el momento en el que fue fundido el viaducto.

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: CONC

Material Type: Concrete

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 24

Mass per Unit Volume: 2.4473

Units: KN, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 20000000

Poisson's Ratio, U: 0.2

Coefficient of Thermal Expansion, A: 9.900E-06

Shear Modulus, G: 8333333

Other Properties for Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 28000

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor:

Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Ilustración 9: Ventana Material Property Data (SAP 2000).

A continuación definimos cada una de las secciones que fueron explicadas en los parámetros geométricos obtenidos de la realidad. Para modelar las vigas se utilizó una viga de sección I con simetría en uno solo de sus ejes.

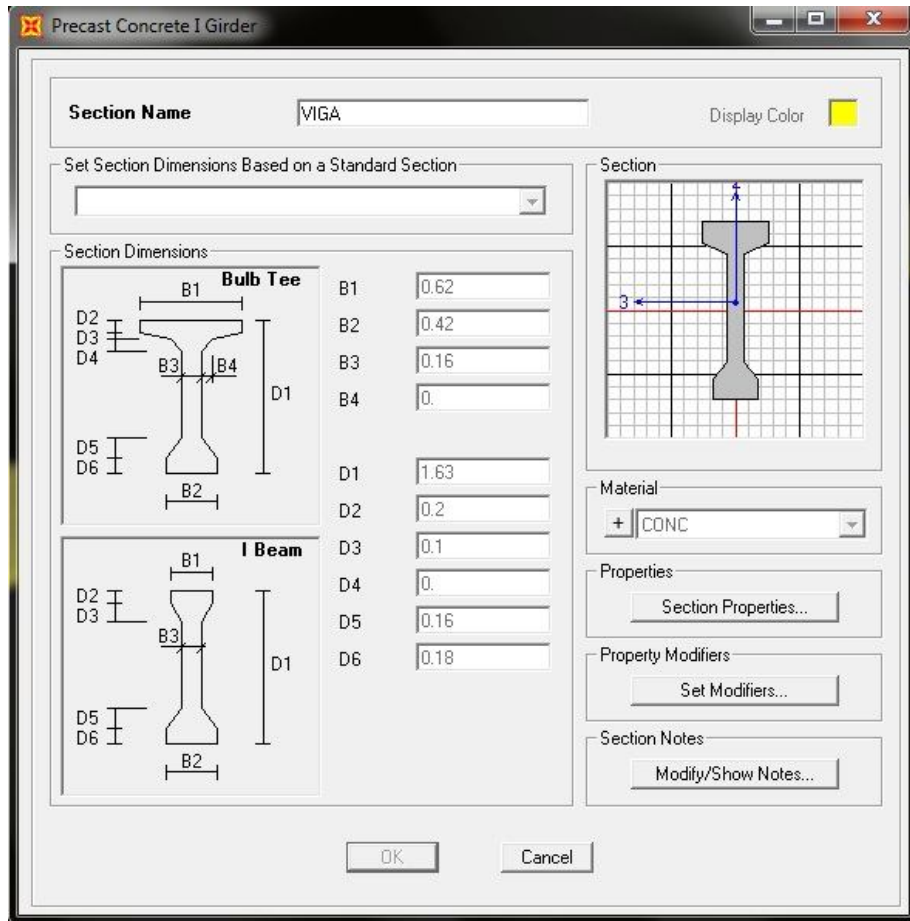


Ilustración 10: Sección Viga I simetría sencilla.

Para modelar la viga cabezal se utilizó una sección de tipo no prismática debido a su cambio de sección transversal a lo largo de su longitud, como muestra la ilustración 9.



Ilustración 11: Viga Cabezal.

Primero se definen las secciones por separado para después poder agruparlas en una sola sección.

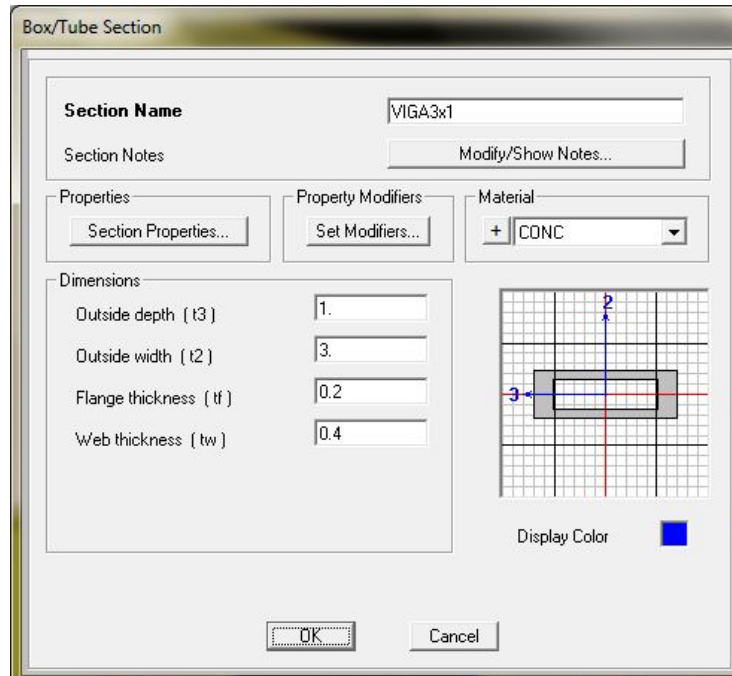


Ilustración 12: Definición sección de la viga cabezal (SAP 2000)

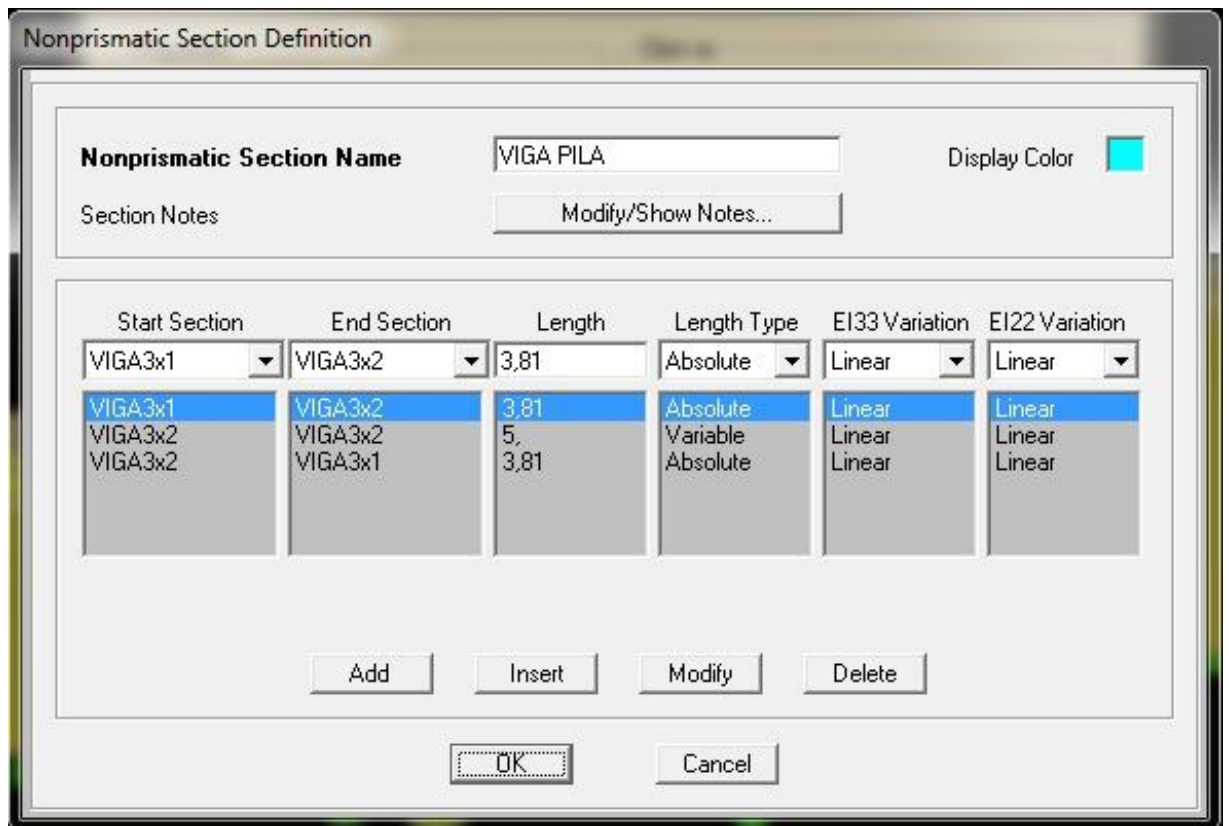


Ilustración 13: Definición sección prismática viga cabeza (SAP 2000)

Las pilas de apoyo fueron definidas como secciones rectangulares huecas con las alturas variables tal y como se encuentran en la realidad, con sus extremos empotrados.

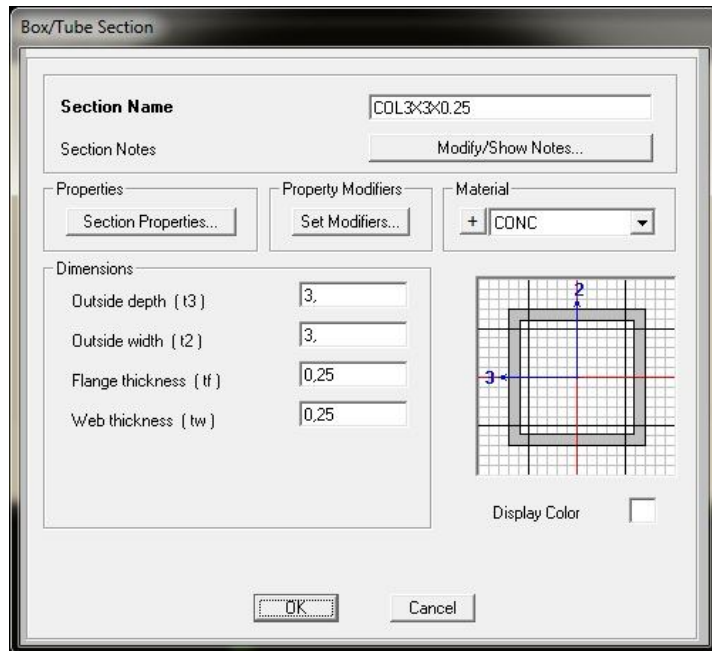


Ilustración 14: Definición sección pilas (SAP 2000)

Ya con las secciones definidas se genera el modelo tridimensional de la estructura.

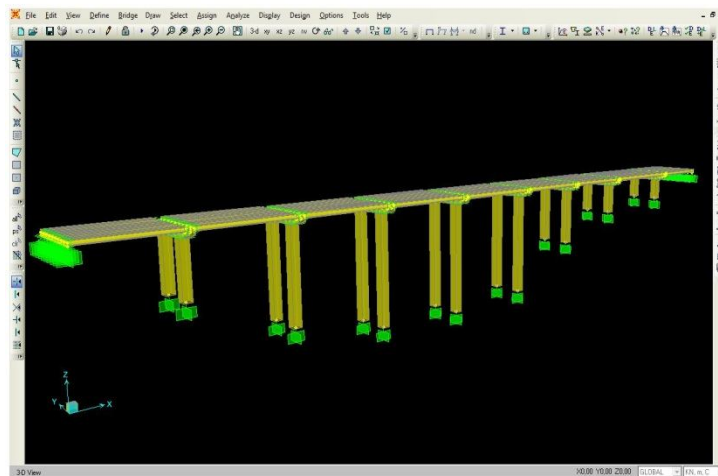


Ilustración 15: Modelo tridimensional del viaducto La Flora (SAP 2000)

4. ANÁLISIS MODAL

Ya teniendo modelada la estructura procedemos a realizar el análisis modal, que consiste en encontrar los diferentes modos naturales, periodos y frecuencias utilizando la herramienta electrónica SAP 2000.

The screenshot shows the 'Load Case Data - Modal' dialog box with the following settings:

- Load Case Name: MODAL
- Load Case Type: Modal
- Stiffness to Use: Zero Initial Conditions - Unstressed State
- Type of Modes: Eigen Vectors
- Number of Modes: Maximum Number of Modes: 54, Minimum Number of Modes: 1
- Loads Applied: Show Advanced Load Parameters
- Other Parameters: Frequency Shift (Center): 0, Cutoff Frequency (Radius): 0, Convergence Tolerance: 1.000E-07

Ilustración 16: Detalles caso modal de análisis (SAP 2000)

En esta estructura se limitaron los modos de vibración a 54 debido estos tienen la mayor participación de masa. A continuación mostramos los resultados arrojados por el programa.

Siendo el modo fundamental el primero, con un periodo de 2.9108 segundos y presenta una deformación de la siguiente manera:

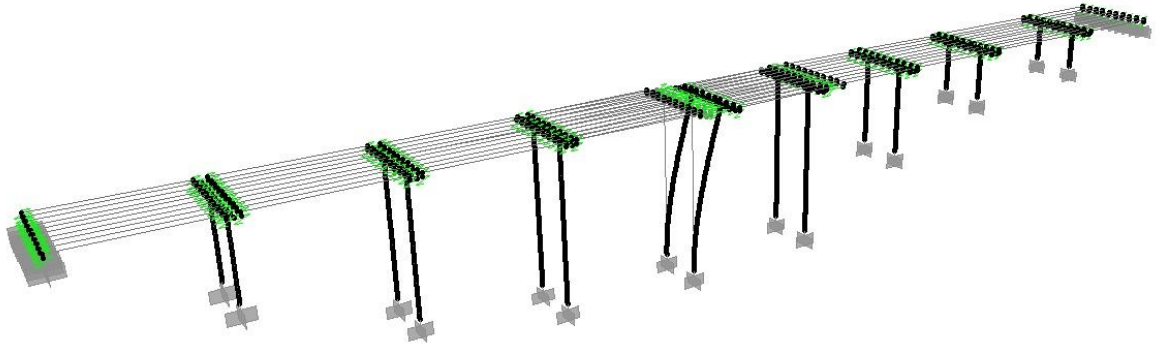


Ilustración 17: Primera forma modal (SAP 2000)

El segundo modo de vibración tiene un periodo de 2.8019 segundos y presenta una deformación de la siguiente manera:

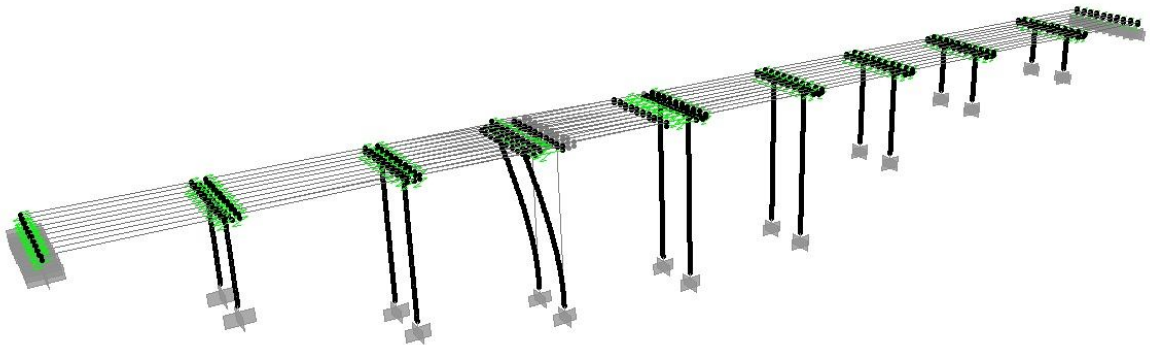


Ilustración 18: Segunda forma modal (SAP 2000)

El tercer modo de vibración tiene un periodo de 2.5564 segundos y presenta una deformación de la siguiente manera:

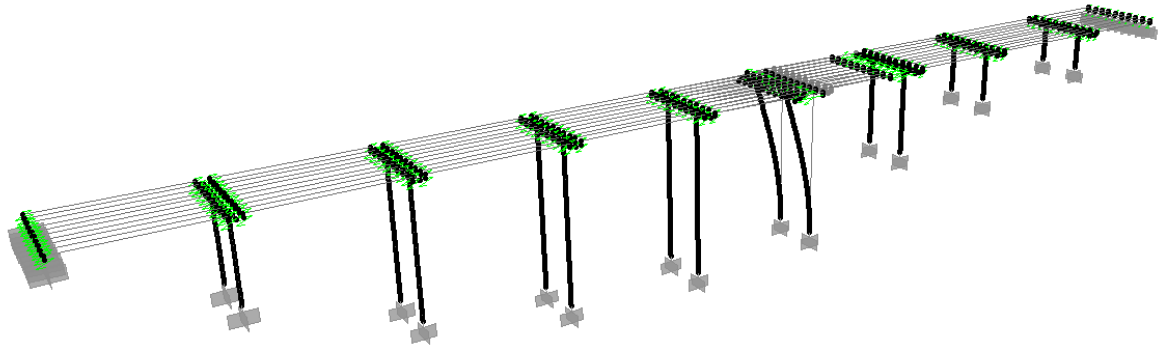


Ilustración 19: Tercer forma modal (SAP 2000)

El tercer modo de vibración tiene un periodo de 2.1236 segundos y presenta una deformación de la siguiente manera:

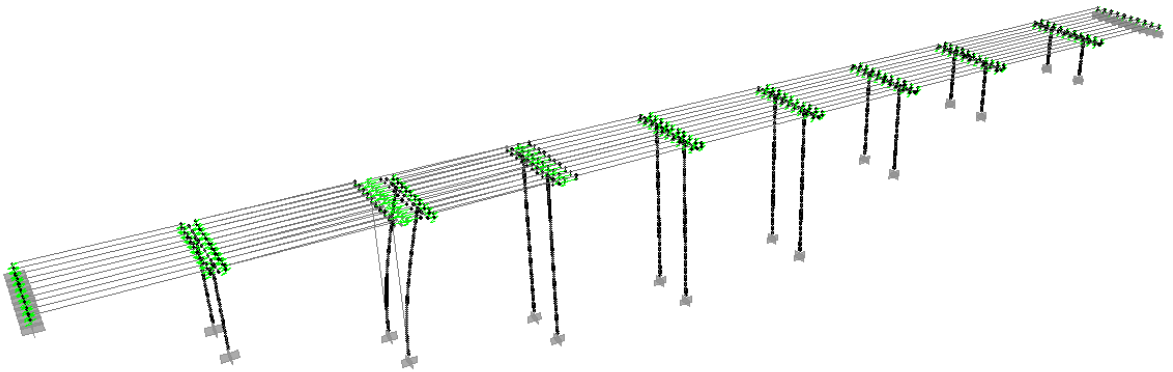


Ilustración 20: Cuarta forma modal (SAP 2000)

A continuación se presenta de forma resumida una tabla con todos los periodos de los diferentes modos de vibración.

| CASO | MODO | Periodo seg | Fracción de masa | CASO | MODO | Periodo seg | Fracción de masa |
|-------|------|----------------|---------------------|-------|------|----------------|---------------------|
| MODAL | 1 | 2.911 | 0.095 | MODAL | 28 | 0.139 | 0.000 |
| MODAL | 2 | 2.802 | 0.101 | MODAL | 29 | 0.137 | 0.000 |
| MODAL | 3 | 2.556 | 0.090 | MODAL | 30 | 0.136 | 0.000 |
| MODAL | 4 | 2.124 | 0.096 | MODAL | 31 | 0.131 | 0.000 |
| MODAL | 5 | 1.187 | 0.082 | MODAL | 32 | 0.130 | 0.000 |
| MODAL | 6 | 0.959 | 0.088 | MODAL | 33 | 0.125 | 0.000 |
| MODAL | 7 | 0.619 | 0.095 | MODAL | 34 | 0.123 | 0.000 |
| MODAL | 8 | 0.398 | 0.050 | MODAL | 35 | 0.113 | 0.000 |
| MODAL | 9 | 0.224 | 0.009 | MODAL | 36 | 0.113 | 0.000 |
| MODAL | 10 | 0.214 | 0.010 | MODAL | 37 | 0.111 | 0.000 |
| MODAL | 11 | 0.204 | 0.009 | MODAL | 38 | 0.107 | 0.000 |
| MODAL | 12 | 0.201 | 0.000 | MODAL | 39 | 0.103 | 0.000 |
| MODAL | 13 | 0.196 | 0.000 | MODAL | 40 | 0.102 | 0.000 |
| MODAL | 14 | 0.195 | 0.000 | MODAL | 41 | 0.095 | 0.000 |
| MODAL | 15 | 0.188 | 0.000 | MODAL | 42 | 0.095 | 0.005 |
| MODAL | 16 | 0.187 | 0.000 | MODAL | 43 | 0.093 | 0.067 |
| MODAL | 17 | 0.179 | 0.000 | MODAL | 44 | 0.090 | 0.000 |
| MODAL | 18 | 0.176 | 0.000 | MODAL | 45 | 0.089 | 0.000 |
| MODAL | 19 | 0.169 | 0.000 | MODAL | 46 | 0.086 | 0.000 |
| MODAL | 20 | 0.166 | 0.000 | MODAL | 47 | 0.086 | 0.000 |
| MODAL | 21 | 0.161 | 0.000 | MODAL | 48 | 0.085 | 0.002 |
| MODAL | 22 | 0.158 | 0.008 | MODAL | 49 | 0.085 | 0.000 |
| MODAL | 23 | 0.155 | 0.069 | MODAL | 50 | 0.084 | 0.000 |
| MODAL | 24 | 0.149 | 0.000 | MODAL | 51 | 0.083 | 0.000 |
| MODAL | 25 | 0.147 | 0.000 | MODAL | 52 | 0.083 | 0.002 |
| MODAL | 26 | 0.141 | 0.000 | MODAL | 53 | 0.082 | 0.001 |
| MODAL | 27 | 0.140 | 0.000 | MODAL | 54 | 0.080 | 0.002 |

Tabla 2: Periodos y frecuencias para los 54 modos de vibración (SAP 2000)

5. ANÁLISIS DINÁMICO

Para los diferentes tipos de análisis que se plantearon para este proyecto se hace necesario el uso del espectro de respuesta de puentes para la ciudad de Bucaramanga, planteado en el Código Colombiano de Puentes y una serie de acelerogramas para analizar la respuesta de la estructura ante un sismo.

Para realizar el análisis dinámico modal-espectral montamos el espectro de diseño en SAP.

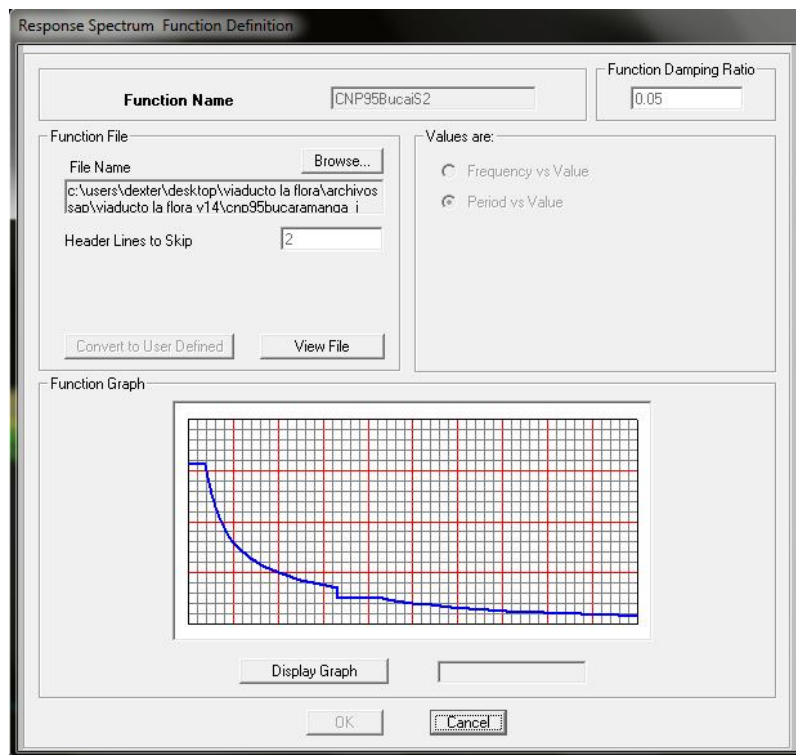


Ilustración 21: Espectro de respuesta para puentes de Bucaramanga.

$A_a = 0.25$, $S = 1.2$, $I = 1$ y Tipo de suelo = S2.

En cambio para realizar un análisis de historias en el tiempo es necesario conocer sismos similares a los que puedan ocurrir en la meseta de Bucaramanga, éstos fueron obtenidos de la microzonificación sísmica realizada por INGEOMINAS y arrojó que un escenario sísmico compatible para la falla de Bucaramanga-Santa Marta sería un evento de magnitudes entre 5.6 y 6.0, a distancia a la fuente de 13 a 25 Km. De la falla Frontal se obtuvo que evento de magnitud entre 6.9 y 7.3 y distancia al sitio de 6.9 a 7.3 Km, a distancias a la fuente de 60 a 80 Km.

El mismo estudio estableció que los acelerogramas compatibles con la falla de Bucaramanga-Santa Marta deben ser escalados a 0.16g y los acelerogramas compatibles con la falla Frontal de los Llanos Orientales deben escalarse a 0.21g, que son los valores correspondientes a la probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, es decir, un periodo de retorno de 475 años.

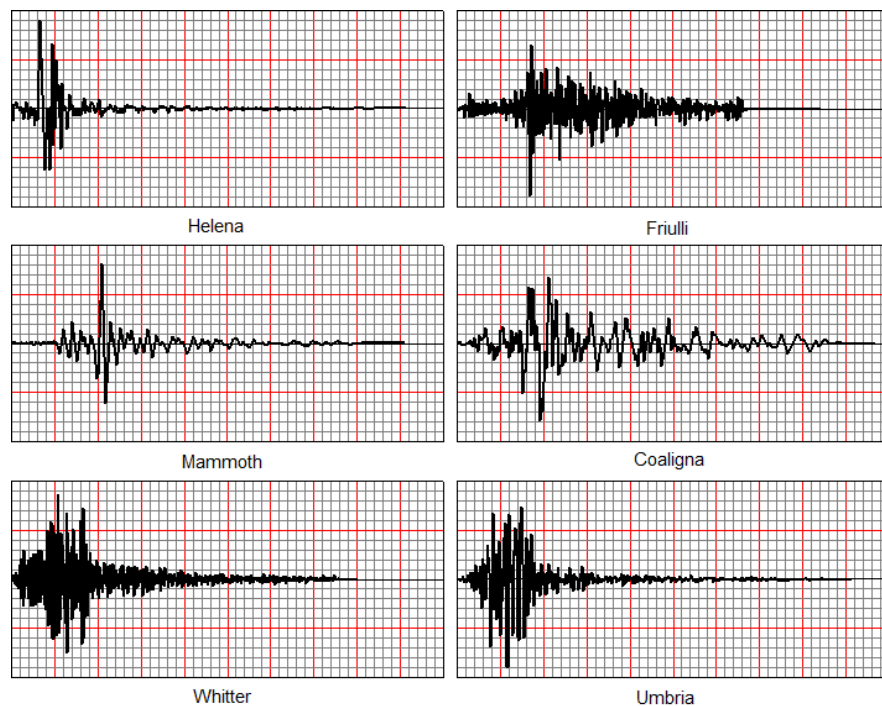


Ilustración 22: Grupo de acelerogramas compatibles con la falla Bucaramanga-Santa Marta.

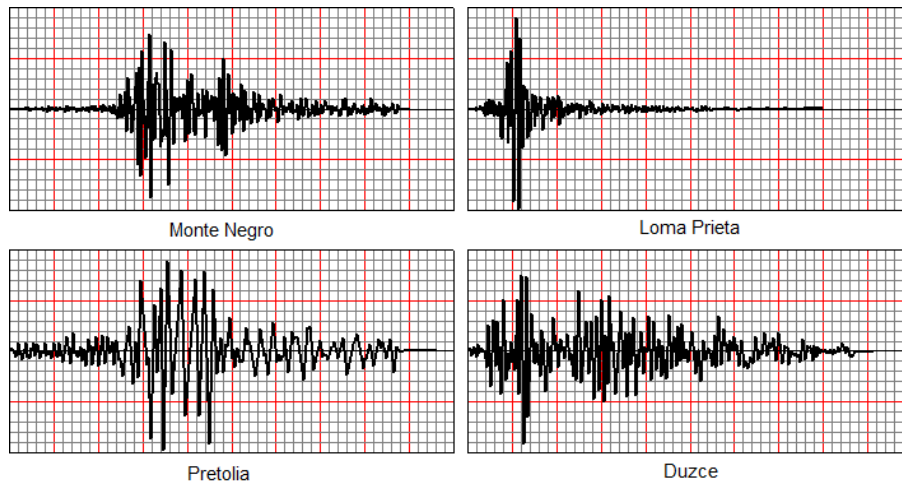


Ilustración 23: Grupo de acelerogramas compatibles con la falla Frontal de los Llanos Orientales.

Utilizando la herramienta electrónica montamos los acelerogramas para que afecten a la estructura.

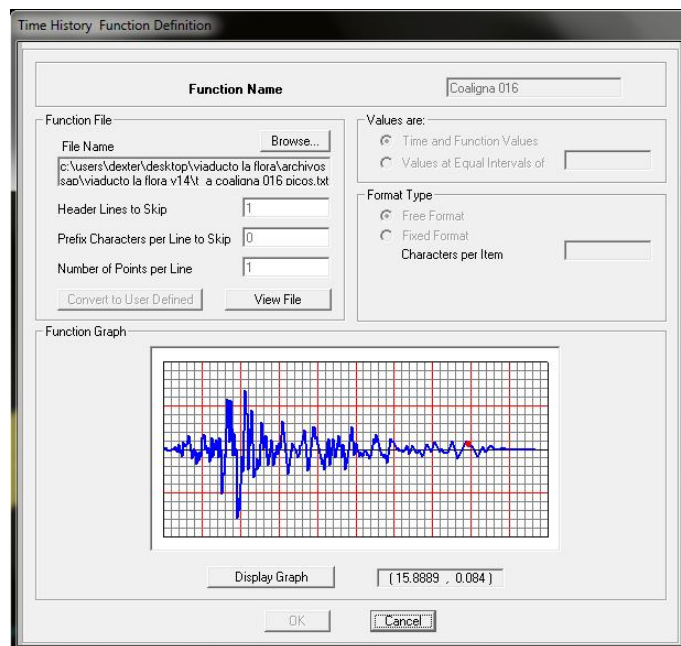


Ilustración 24: Acelerograma de Coaligna (SAP 2000)

5.1. ANÁLISIS DINÁMICO MODAL-ESPECTRAL.

Un análisis de respuesta del espectro entre modos de transporte consiste en el análisis de un modelo matemático lineal de la estructura para determinar las aceleraciones, máximas, las fuerzas y desplazamientos derivados de la respuesta dinámica a los movimientos de la tierra representada por el espectro de respuesta de diseño.

Para realizar en análisis dinámico modal-espectral se debe primero introducir el espectro en el sistema del SAP como lo mostramos anteriormente. A continuación definimos el caso dinámico espectral para el sismo en ambas direcciones.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: SismoXX [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Response Spectrum [Design...]

Modal Combination:

- CQC GMC #1: 1.0 GMC #2: 0.0
- SRSS
- Absolute
- GMC Periodic + Rigid Type: SRSS
- NRC 10 Percent
- Double Sum

Directional Combination:

- SRSS
- CQC3
- Absolute
- Scale Factor: []

Modal Load Case: Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

Loads Applied:

| Load Type | Load Name | Function | Scale Factor |
|-----------|-----------|-------------|--------------|
| Accel | U1 | CNP95Buca | 9.81 |
| Accel | U1 | CNP95BucaS2 | 9.81 |

[Add] [Modify] [Delete]

Show Advanced Load Parameters

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Ilustración 25: Definición del sismo en dirección X (SAP 2000)

Y el programa procede a realizar los cálculos y arrojar lo siguientes resultados.

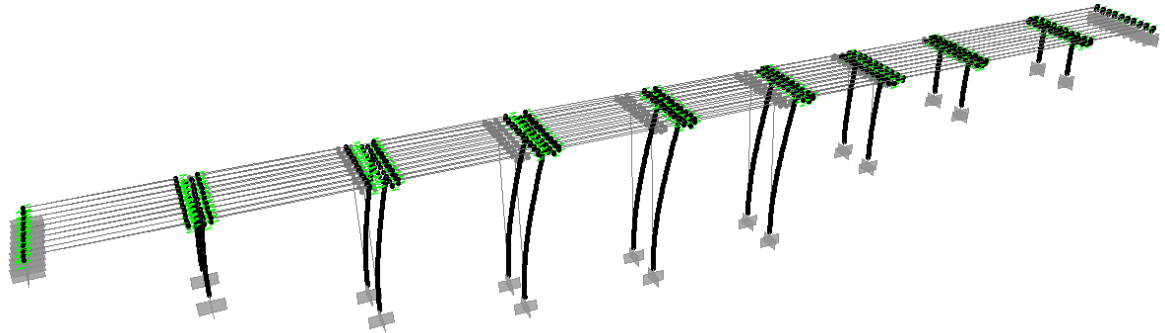


Ilustración 26: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo en dirección x.

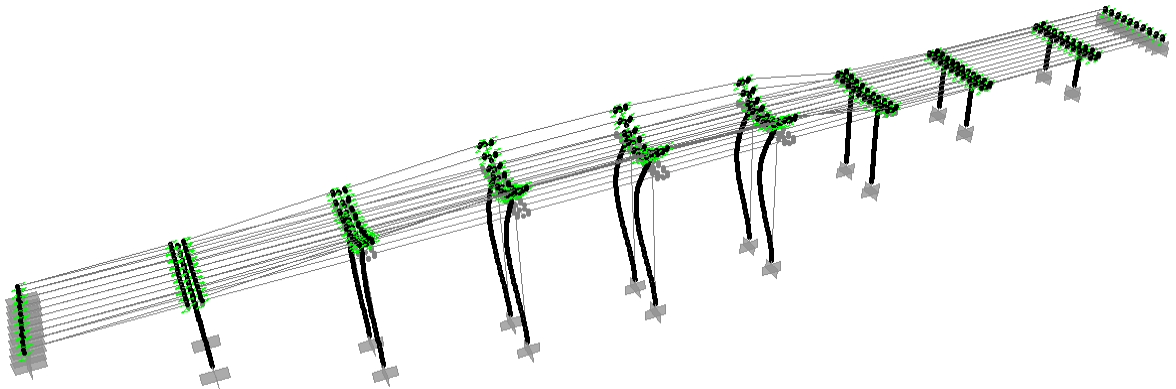


Ilustración 27: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo en dirección y.

Utilizando el análisis modal ya realizado y el espectro, el programa arroja como resultado la aceleración para cada uno de los modos de vibración tanto en dirección x como en dirección y.

| CASO | MODO | Periodo seg | Ace. m/seg2 | CASO | MODO | Periodo Seg | Ace. m/seg2 |
|---------|------|----------------|----------------|---------|------|----------------|----------------|
| SismoXX | 1 | 2.91085 | 1.73694 | SismoXX | 28 | 0.13902 | 6.13125 |
| SismoXX | 2 | 2.80189 | 1.78476 | SismoXX | 29 | 0.1369 | 6.13125 |
| SismoXX | 3 | 2.55639 | 1.8925 | SismoXX | 30 | 0.13623 | 6.13125 |
| SismoXX | 4 | 2.12361 | 2.14875 | SismoXX | 31 | 0.13053 | 6.13125 |
| SismoXX | 5 | 1.18701 | 3.15168 | SismoXX | 32 | 0.12964 | 6.13125 |
| SismoXX | 6 | 0.95926 | 3.6363 | SismoXX | 33 | 0.12533 | 6.13125 |
| SismoXX | 7 | 0.61909 | 4.87191 | SismoXX | 34 | 0.12271 | 6.13125 |
| SismoXX | 8 | 0.3978 | 6.13125 | SismoXX | 35 | 0.11321 | 6.13125 |
| SismoXX | 9 | 0.22389 | 6.13125 | SismoXX | 36 | 0.11297 | 6.13125 |
| SismoXX | 10 | 0.21437 | 6.13125 | SismoXX | 37 | 0.11098 | 6.13125 |
| SismoXX | 11 | 0.20386 | 6.13125 | SismoXX | 38 | 0.10673 | 6.13125 |
| SismoXX | 12 | 0.20104 | 6.13125 | SismoXX | 39 | 0.10343 | 6.13125 |
| SismoXX | 13 | 0.19636 | 6.13125 | SismoXX | 40 | 0.10225 | 6.13125 |
| SismoXX | 14 | 0.19527 | 6.13125 | SismoXX | 41 | 0.09519 | 6.13125 |
| SismoXX | 15 | 0.18784 | 6.13125 | SismoXX | 42 | 0.09492 | 6.13125 |
| SismoXX | 16 | 0.18707 | 6.13125 | SismoXX | 43 | 0.09337 | 6.13125 |
| SismoXX | 17 | 0.17932 | 6.13125 | SismoXX | 44 | 0.09018 | 6.13125 |
| SismoXX | 18 | 0.17555 | 6.13125 | SismoXX | 45 | 0.08931 | 6.13125 |
| SismoXX | 19 | 0.1686 | 6.13125 | SismoXX | 46 | 0.08637 | 6.13125 |
| SismoXX | 20 | 0.16566 | 6.13125 | SismoXX | 47 | 0.08631 | 6.13125 |
| SismoXX | 21 | 0.16135 | 6.13125 | SismoXX | 48 | 0.08545 | 6.13125 |
| SismoXX | 22 | 0.15806 | 6.13125 | SismoXX | 49 | 0.08503 | 6.13125 |
| SismoXX | 23 | 0.15512 | 6.13125 | SismoXX | 50 | 0.08444 | 6.13125 |
| SismoXX | 24 | 0.14902 | 6.13125 | SismoXX | 51 | 0.08311 | 6.13125 |
| SismoXX | 25 | 0.14695 | 6.13125 | SismoXX | 52 | 0.0831 | 6.13125 |
| SismoXX | 26 | 0.14127 | 6.13125 | SismoXX | 53 | 0.08217 | 6.13125 |
| SismoXX | 27 | 0.14012 | 6.13125 | SismoXX | 54 | 0.07955 | 6.13125 |

Tabla 3: Aceleraciones para cada uno de los modos de vibración producidos por el sismo en dirección x.

| CASO | MODO | Periodo seg | Ace. m/seg2 | CASO | MODO | Periodo Seg | Ace. m/seg2 |
|---------|------|----------------|----------------|---------|------|----------------|----------------|
| SismoYY | 1 | 2.91085 | 1.73694 | SismoYY | 28 | 0.13902 | 6.13125 |
| SismoYY | 2 | 2.80189 | 1.78476 | SismoYY | 29 | 0.1369 | 6.13125 |
| SismoYY | 3 | 2.55639 | 1.8925 | SismoYY | 30 | 0.13623 | 6.13125 |
| SismoYY | 4 | 2.12361 | 2.14875 | SismoYY | 31 | 0.13053 | 6.13125 |
| SismoYY | 5 | 1.18701 | 3.15168 | SismoYY | 32 | 0.12964 | 6.13125 |
| SismoYY | 6 | 0.95926 | 3.6363 | SismoYY | 33 | 0.12533 | 6.13125 |
| SismoYY | 7 | 0.61909 | 4.87191 | SismoYY | 34 | 0.12271 | 6.13125 |
| SismoYY | 8 | 0.3978 | 6.13125 | SismoYY | 35 | 0.11321 | 6.13125 |
| SismoYY | 9 | 0.22389 | 6.13125 | SismoYY | 36 | 0.11297 | 6.13125 |
| SismoYY | 10 | 0.21437 | 6.13125 | SismoYY | 37 | 0.11098 | 6.13125 |
| SismoYY | 11 | 0.20386 | 6.13125 | SismoYY | 38 | 0.10673 | 6.13125 |
| SismoYY | 12 | 0.20104 | 6.13125 | SismoYY | 39 | 0.10343 | 6.13125 |
| SismoYY | 13 | 0.19636 | 6.13125 | SismoYY | 40 | 0.10225 | 6.13125 |
| SismoYY | 14 | 0.19527 | 6.13125 | SismoYY | 41 | 0.09519 | 6.13125 |
| SismoYY | 15 | 0.18784 | 6.13125 | SismoYY | 42 | 0.09492 | 6.13125 |
| SismoYY | 16 | 0.18707 | 6.13125 | SismoYY | 43 | 0.09337 | 6.13125 |
| SismoYY | 17 | 0.17932 | 6.13125 | SismoYY | 44 | 0.09018 | 6.13125 |
| SismoYY | 18 | 0.17555 | 6.13125 | SismoYY | 45 | 0.08931 | 6.13125 |
| SismoYY | 19 | 0.1686 | 6.13125 | SismoYY | 46 | 0.08637 | 6.13125 |
| SismoYY | 20 | 0.16566 | 6.13125 | SismoYY | 47 | 0.08631 | 6.13125 |
| SismoYY | 21 | 0.16135 | 6.13125 | SismoYY | 48 | 0.08545 | 6.13125 |
| SismoYY | 22 | 0.15806 | 6.13125 | SismoYY | 49 | 0.08503 | 6.13125 |
| SismoYY | 23 | 0.15512 | 6.13125 | SismoYY | 50 | 0.08444 | 6.13125 |
| SismoYY | 24 | 0.14902 | 6.13125 | SismoYY | 51 | 0.08311 | 6.13125 |
| SismoYY | 25 | 0.14695 | 6.13125 | SismoYY | 52 | 0.0831 | 6.13125 |
| SismoYY | 26 | 0.14127 | 6.13125 | SismoYY | 53 | 0.08217 | 6.13125 |
| SismoYY | 27 | 0.14012 | 6.13125 | SismoYY | 54 | 0.07955 | 6.13125 |

Tabla 4: Aceleraciones para cada uno de los modos de vibración producidos por el sismo en dirección y.

Además de las aceleraciones también obtenemos las reacciones en la base de toda la estructura y los momentos.

| PILA\DIR | EN X | EN Y |
|----------|---------|--------|
| 1 | 4765.02 | 67.21 |
| 2 | 3120.32 | 841.64 |
| 3 | 2749.14 | 932.39 |
| 4 | 2690.73 | 966.36 |
| 5 | 2651.16 | 908.35 |
| 6 | 3841.26 | 100.11 |
| 7 | 6896.82 | 45.82 |
| 8 | 5272.50 | 40.92 |

Tabla 5: Reacciones en la base producidos por los sismos en x y y.

5.2. ANÁLISIS DE HISTORIAS EN EL TIEMPO.

Finalmente para llevar a cabo el análisis de historias en el tiempo es necesario correr todos y cada uno de los sismos de los escenarios sísmicos compatibles obtenidos por el INGEOMINAS.

Load Case Data - Linear Modal History

Load Case Name: Coaligna 016XX [Set Def Name] [Modify/Show...]

Load Case Type: Time History [Design...]

Initial Conditions:
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Modal History []
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:
 Linear
 Nonlinear

Time History Type:
 Modal
 Direct Integration

Time History Motion Type:
 Transient
 Periodic

Modal Load Case:
Use Modes from Case: MODAL []

Loads Applied:

| Load Type | Load Name | Function | Scale Factor |
|-----------|-----------|--------------|--------------|
| Accel | U1 | Coaligna 016 | 1. |
| Accel | U1 | Coaligna 016 | 1. |

[Add] [Modify] [Delete]

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:
Number of Output Time Steps: 970
Output Time Step Size: 0.02

Other Parameters:
Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Ilustración 28: Definición para cada caso de sismo (SAP 2000)

A continuación se mostraran los resultados arrojados para cada uno de los casos, se analizaran desplazamientos en dos puntos de control, uno ubicado en el punto más alto de la pila número uno y otro en la pila más alta. Además de esto, las fuerzas que se produzcan en cada una de las bases debido al efecto de cada uno de los sismos.

5.2.1. Coaligna:

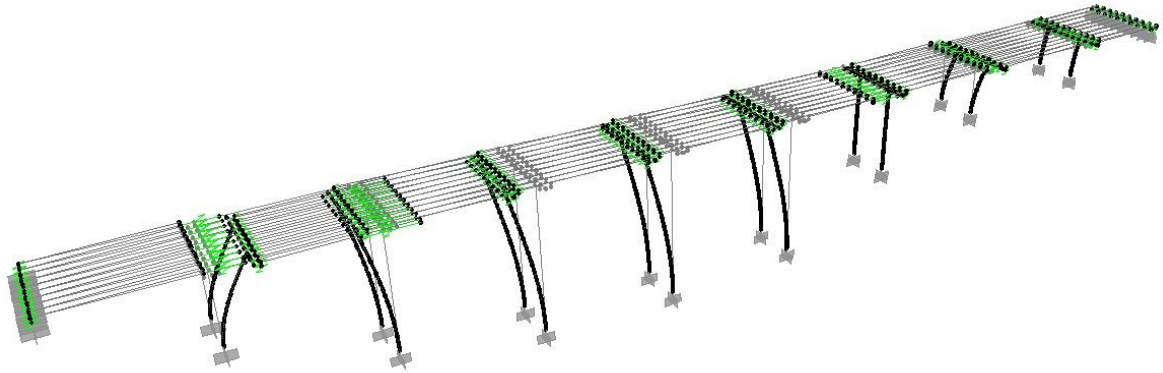


Ilustración 29: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección x (SAP 2000).

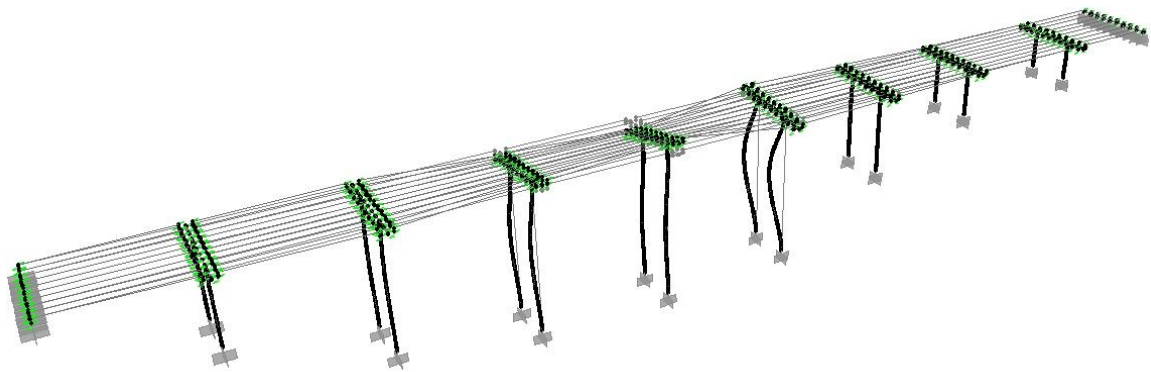


Ilustración 30: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección y (SAP 2000).

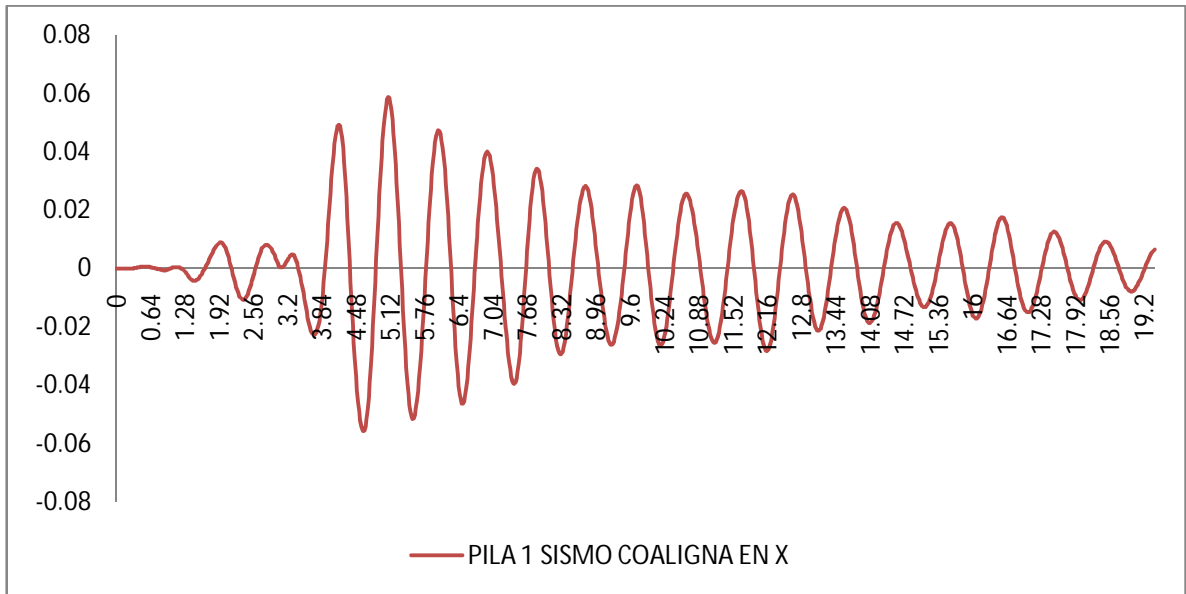


Ilustración 31: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección x.

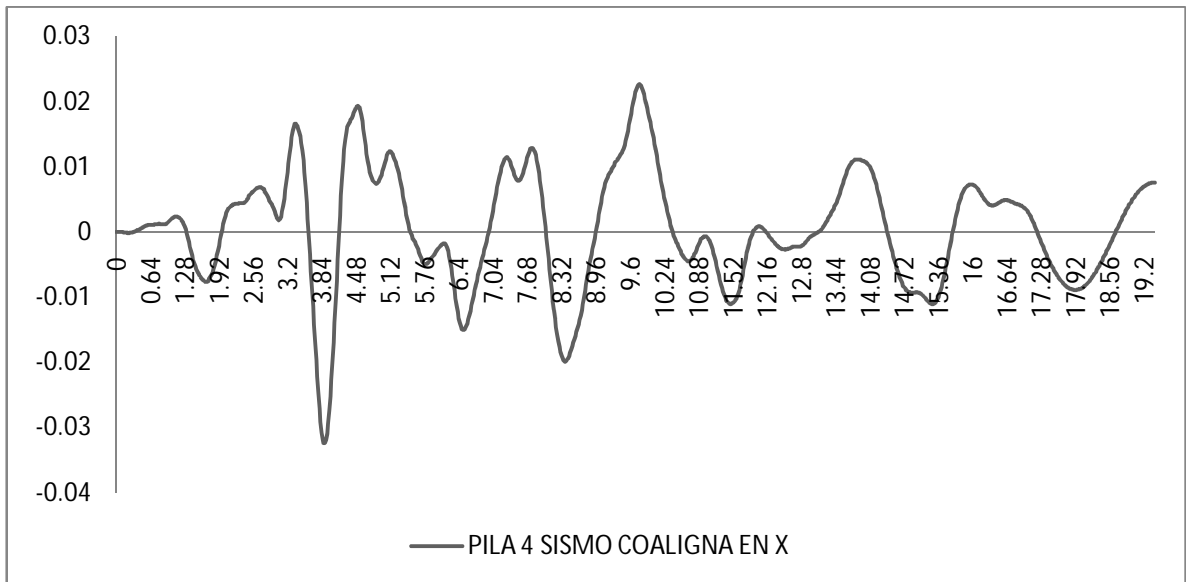


Ilustración 32: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección x.

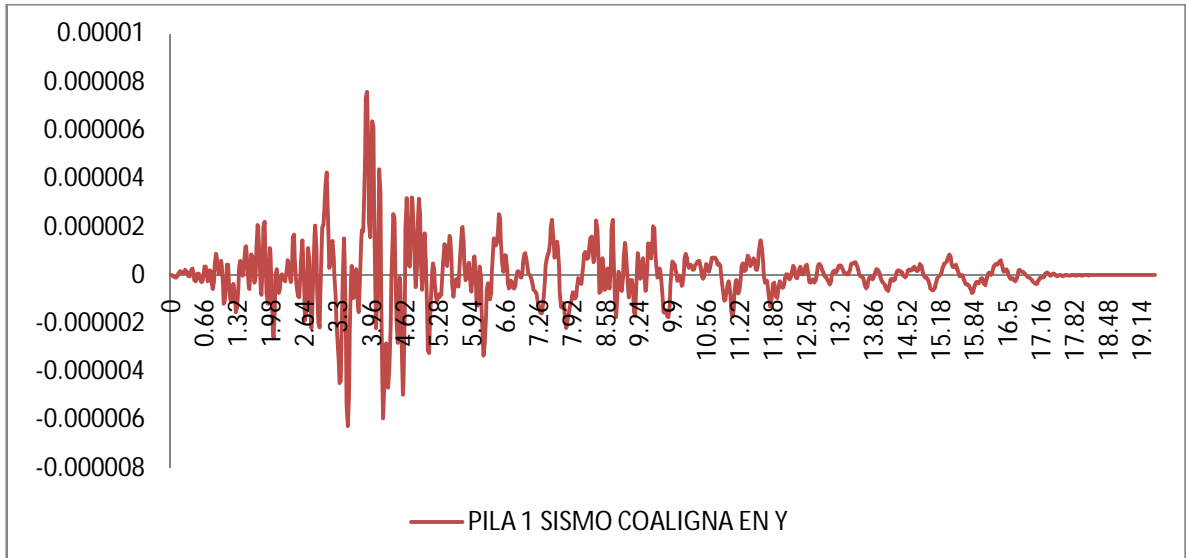


Ilustración 33: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección y.

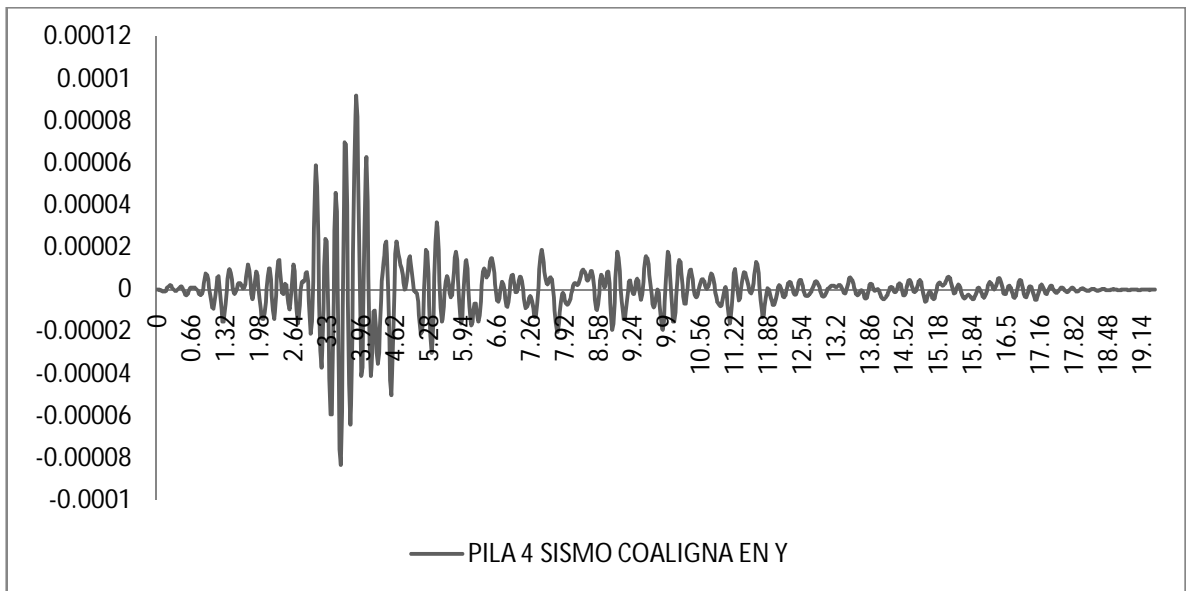


Ilustración 34: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Coaligna aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

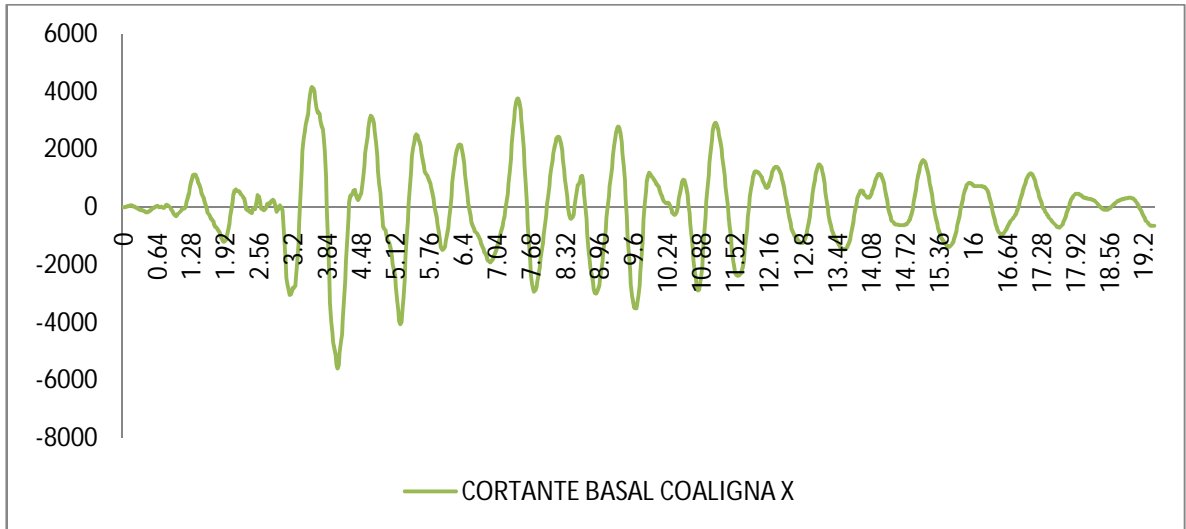


Ilustración 35: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Coaligna en dirección x.

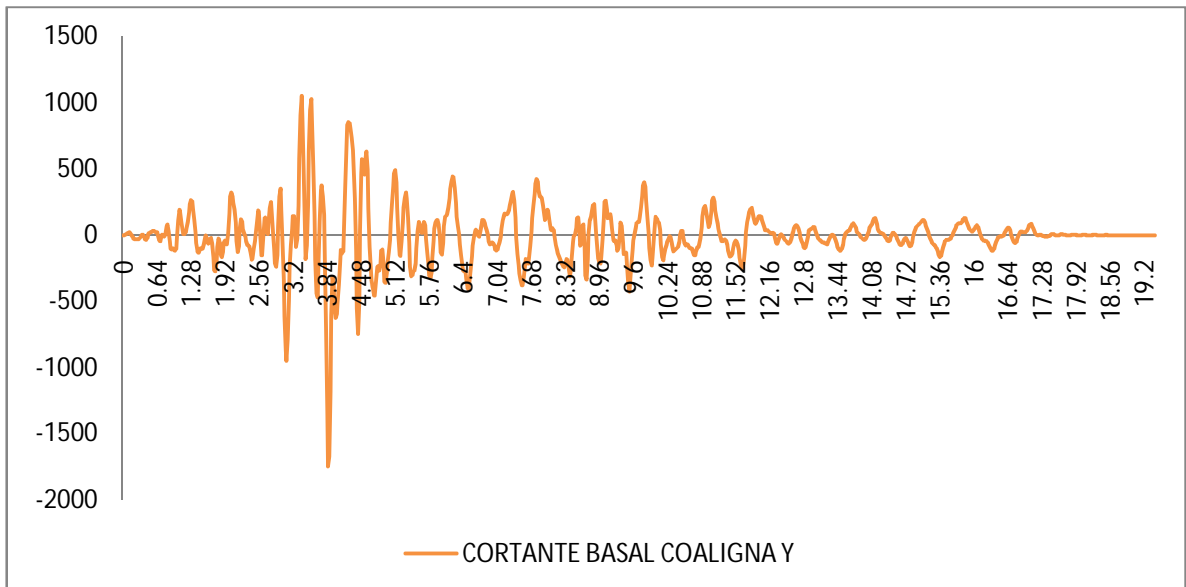


Ilustración 36: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Coaligna en dirección y.

5.2.2. Duzce:

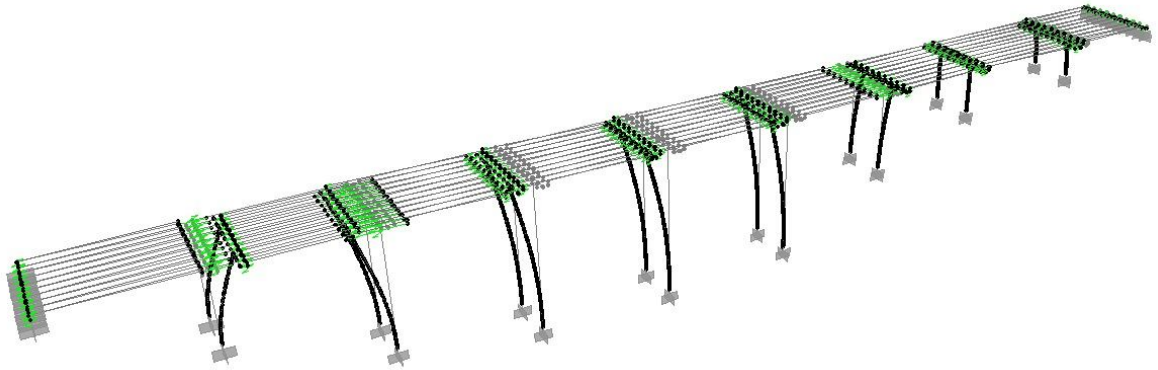


Ilustración 37: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Duzce aplicado en dirección x (SAP 2000).

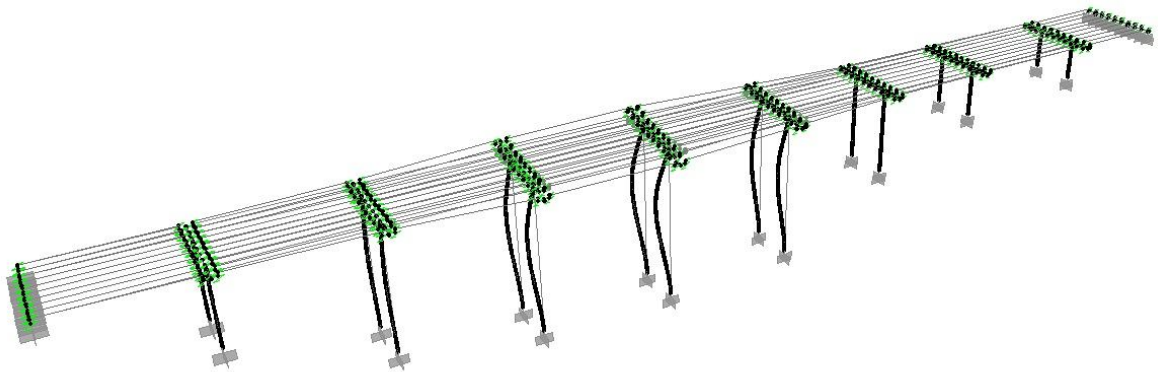


Ilustración 38: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Duzce aplicado en dirección y (SAP 2000).

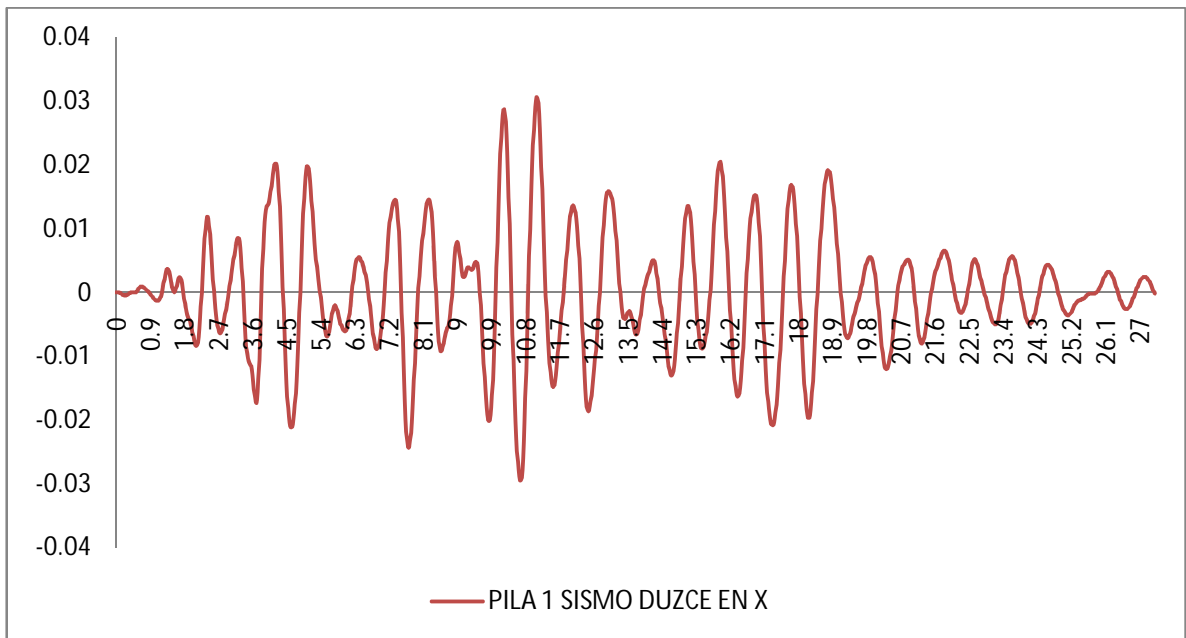


Ilustración 39: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección x.

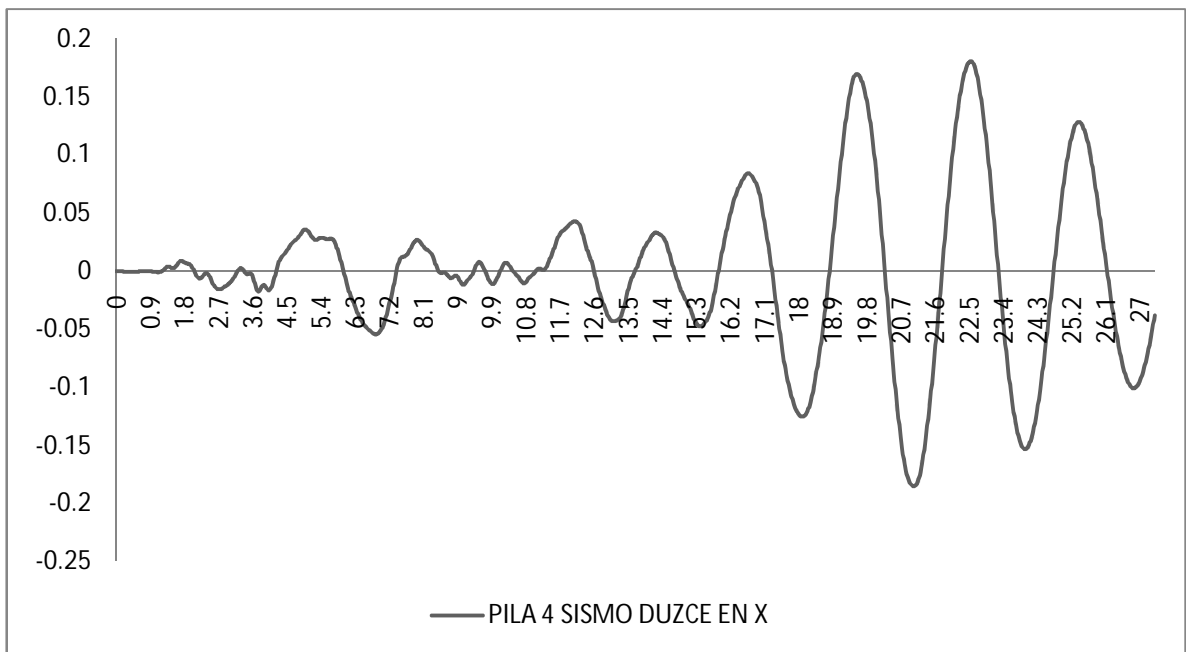


Ilustración 40: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección x.

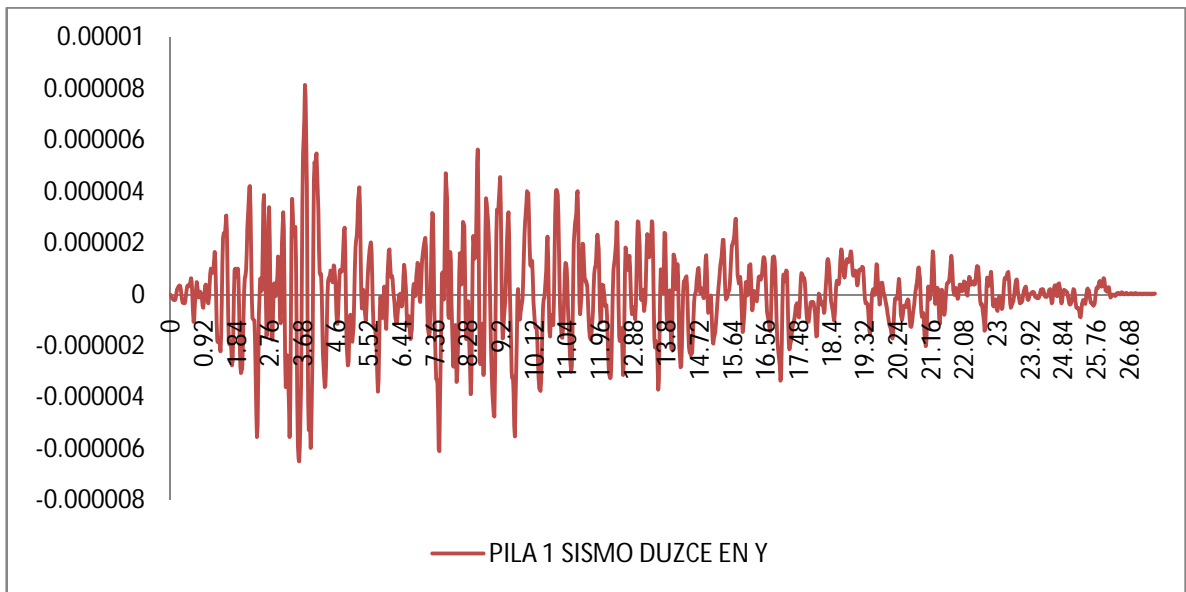


Ilustración 41: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección y.

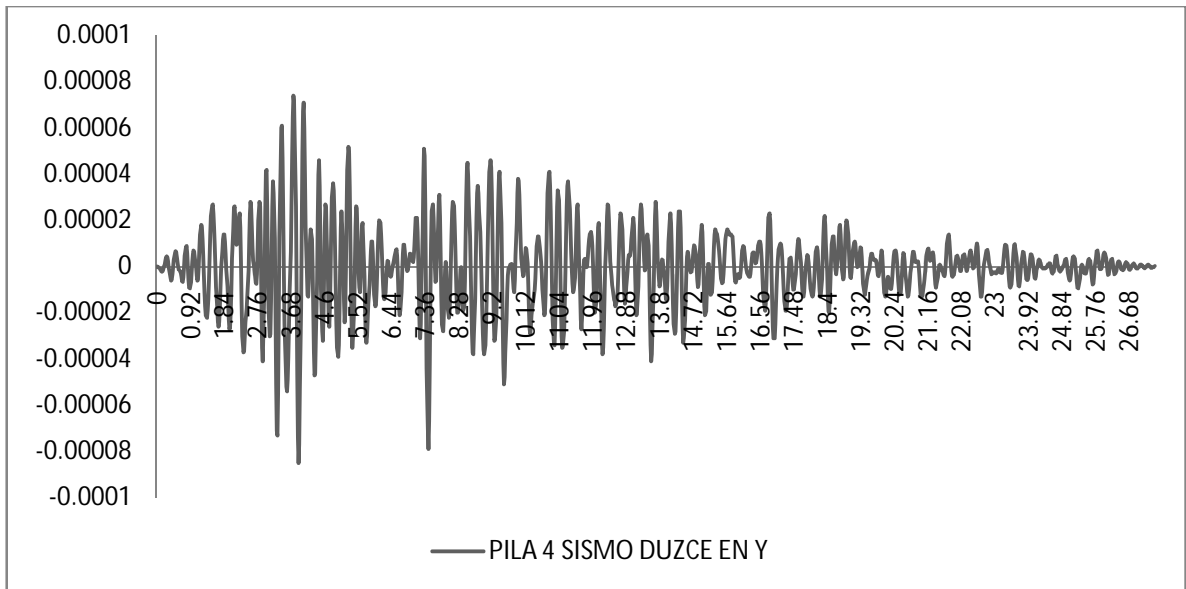


Ilustración 42: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Duzce aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

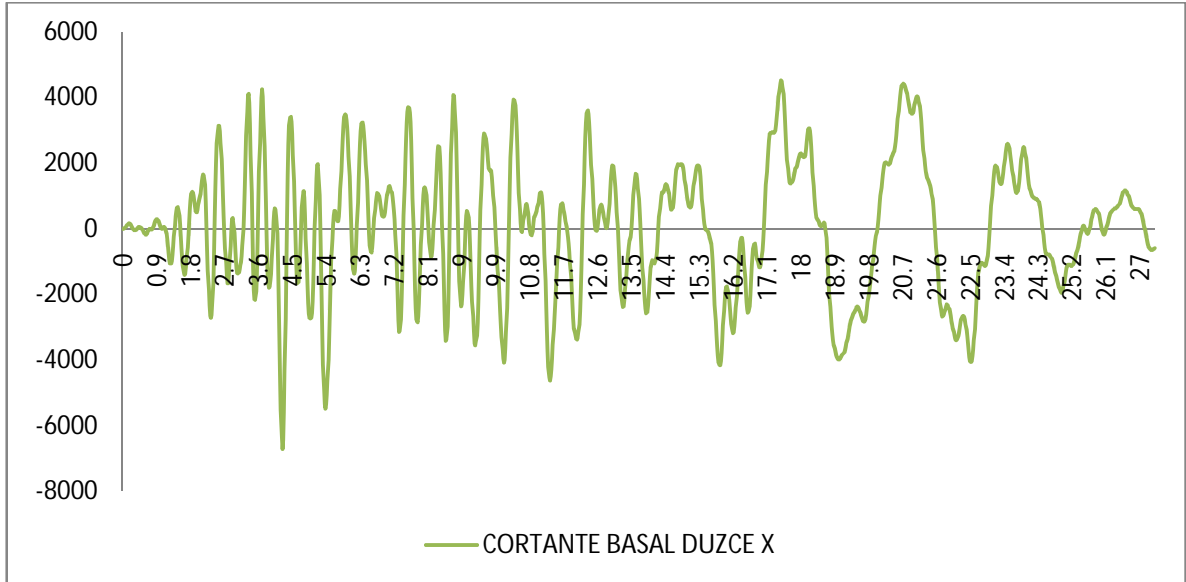


Ilustración 43: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Duzce en dirección x.

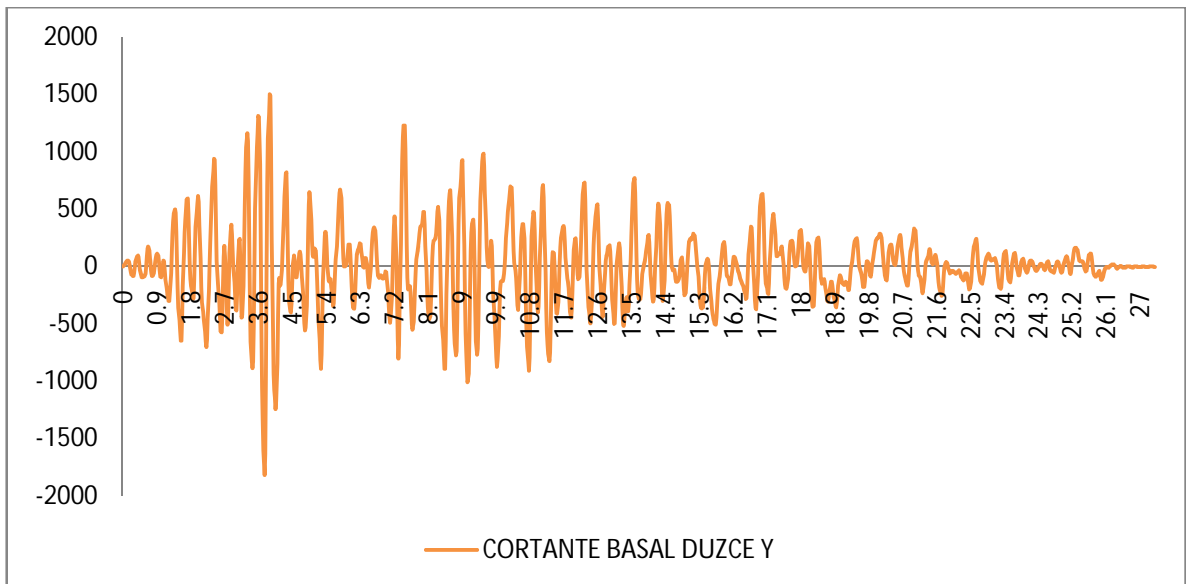


Ilustración 44: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Duzce en dirección y.

5.2.3. Friuli:

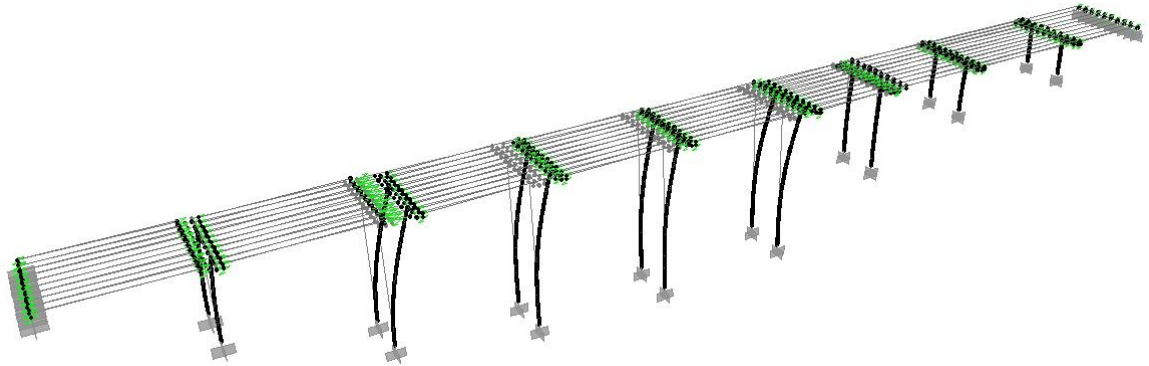


Ilustración 45: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Friuli aplicado en dirección x (SAP 2000).

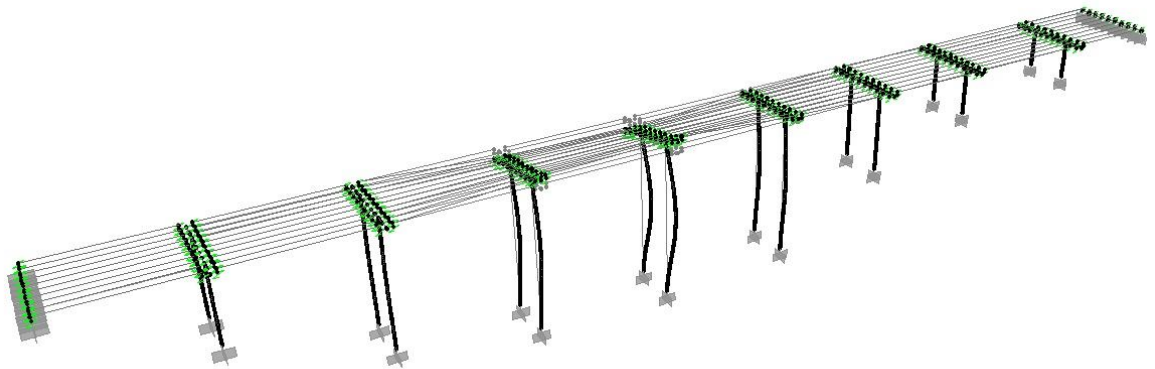


Ilustración 46: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Friuli aplicado en dirección y (SAP 2000).

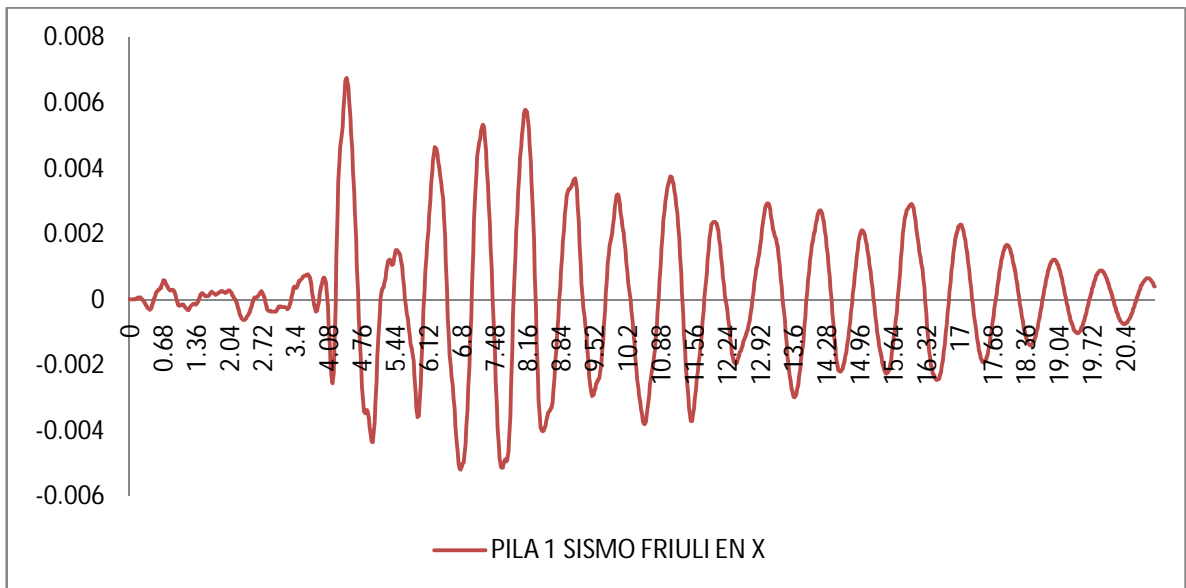


Ilustración 47: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección x.

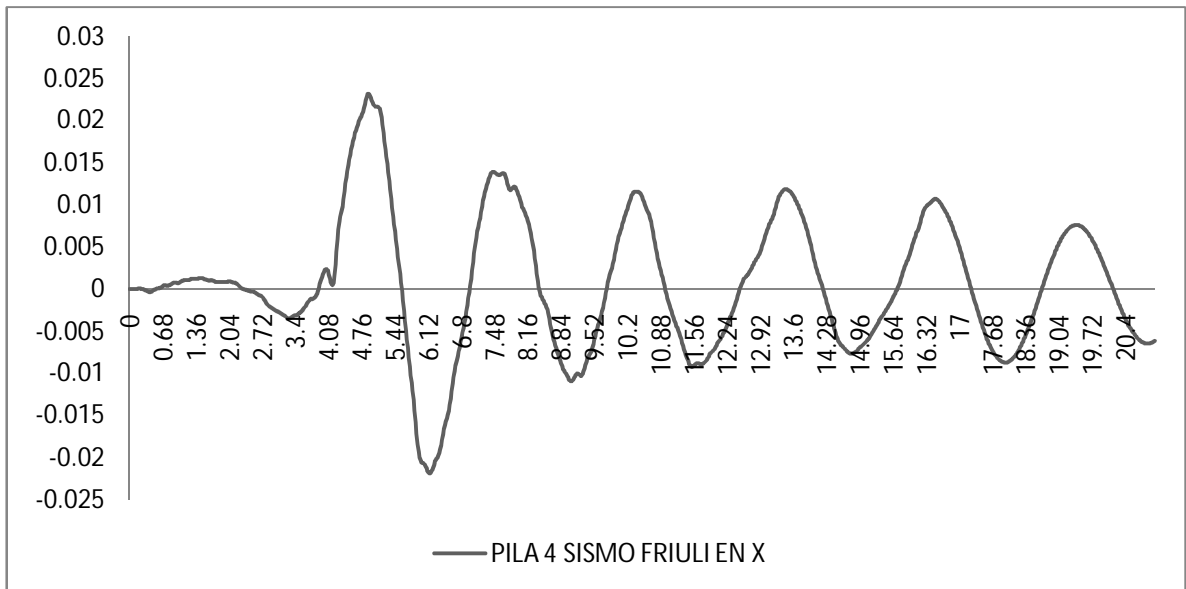


Ilustración 48: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección x.

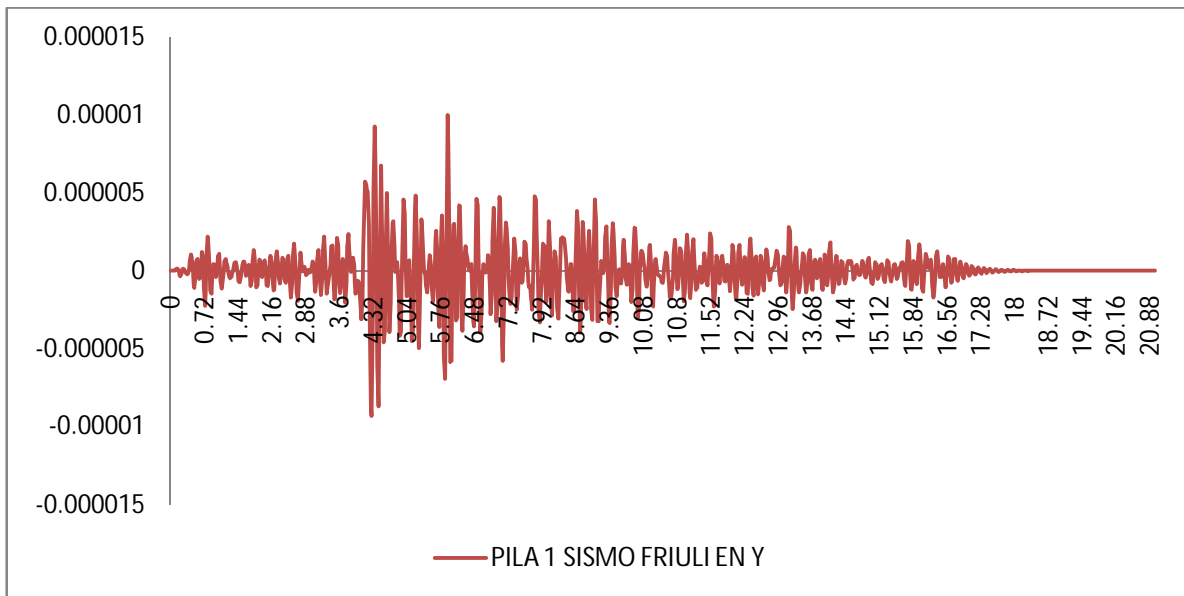


Ilustración 49: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección y.



Ilustración 50: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Friuli aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

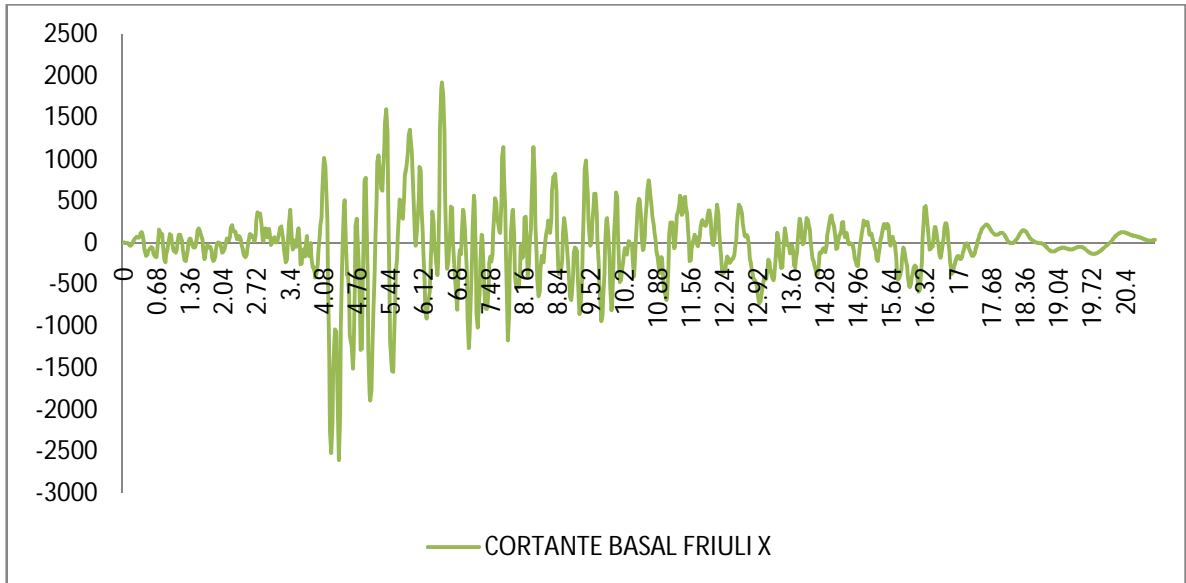


Ilustración 51: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Friuli en dirección x.

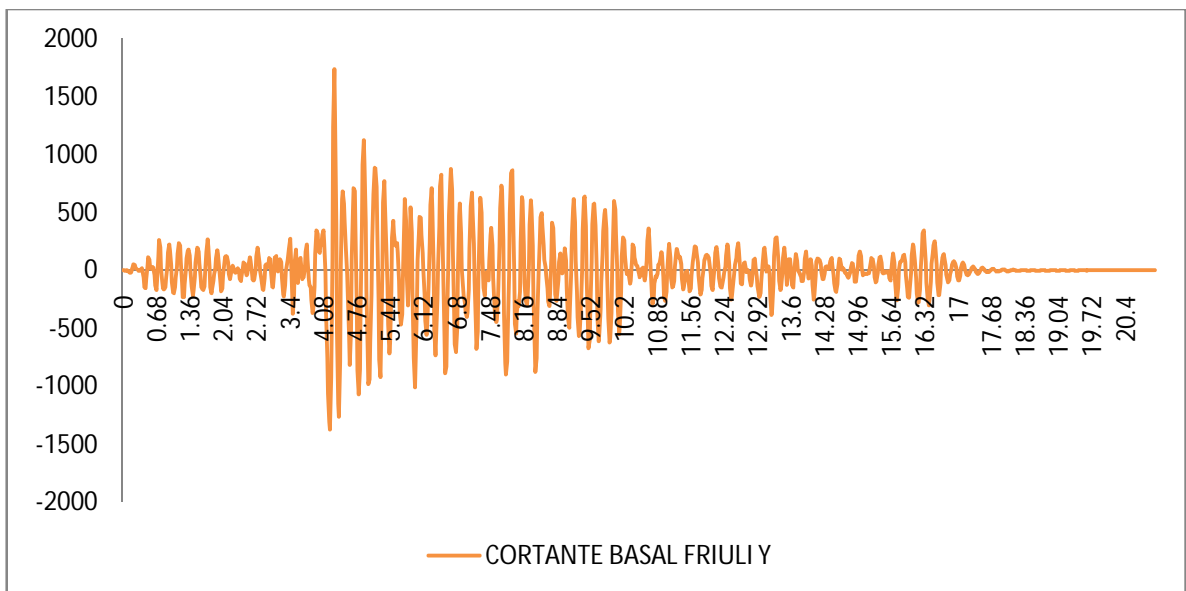


Ilustración 52: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Friuli en dirección y.

5.2.4. Helena:

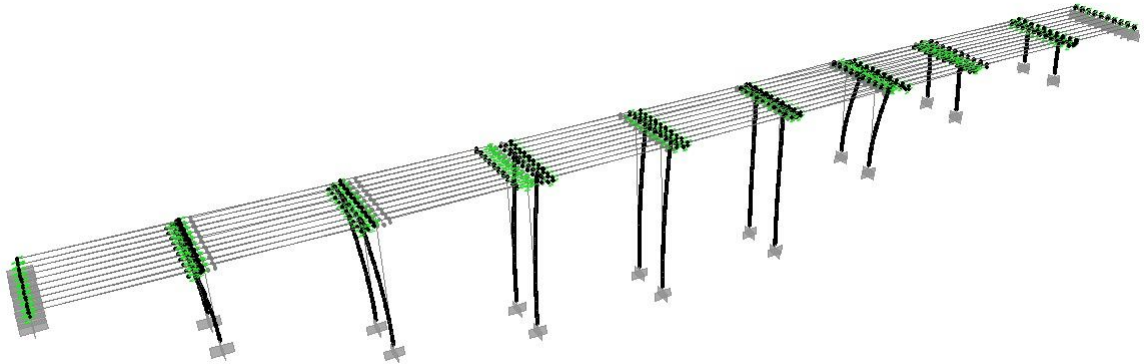


Ilustración 53: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Helena aplicado en dirección x (SAP 2000).

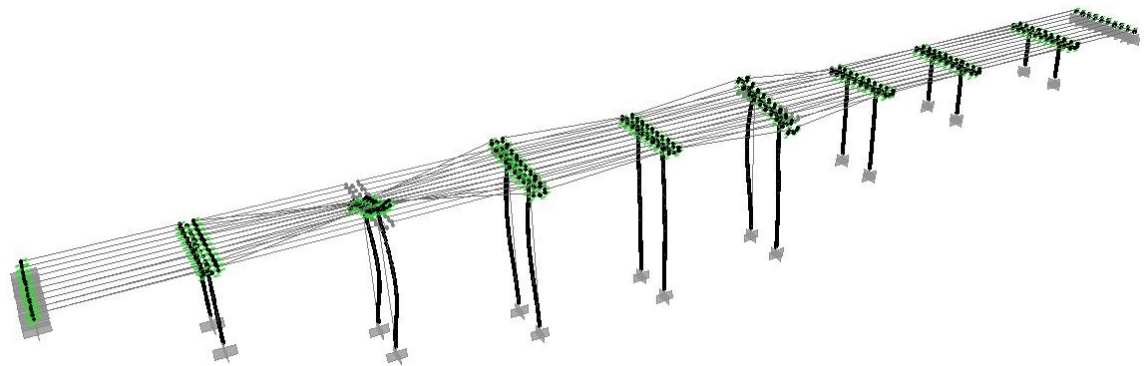


Ilustración 54: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Helena aplicado en dirección y (SAP 2000).



Ilustración 55: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección x.

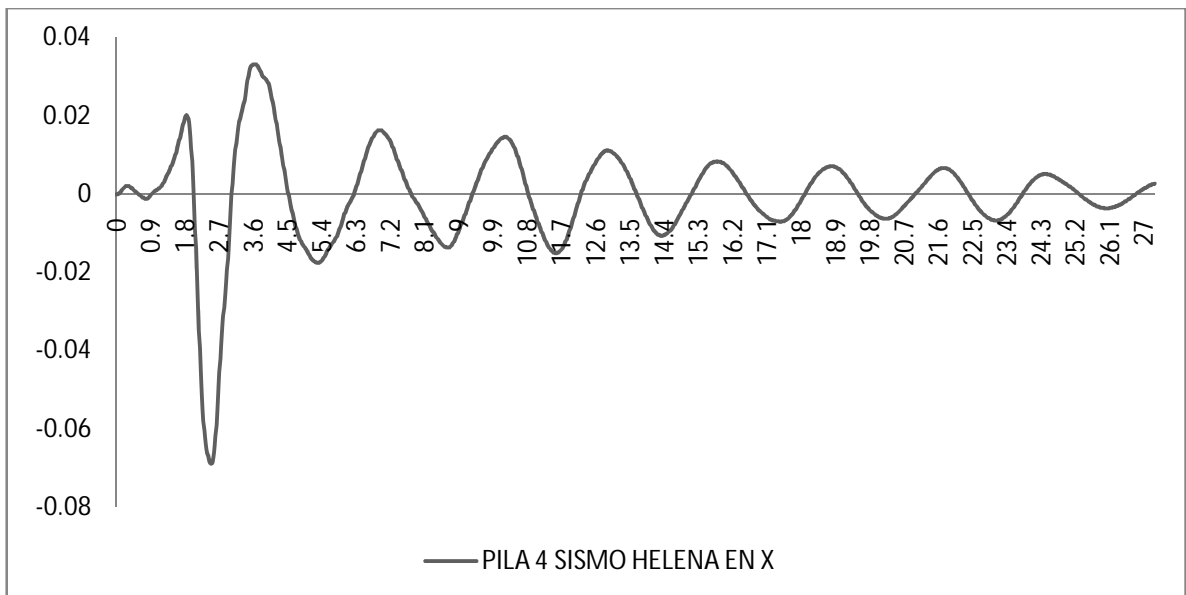


Ilustración 56: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección x.

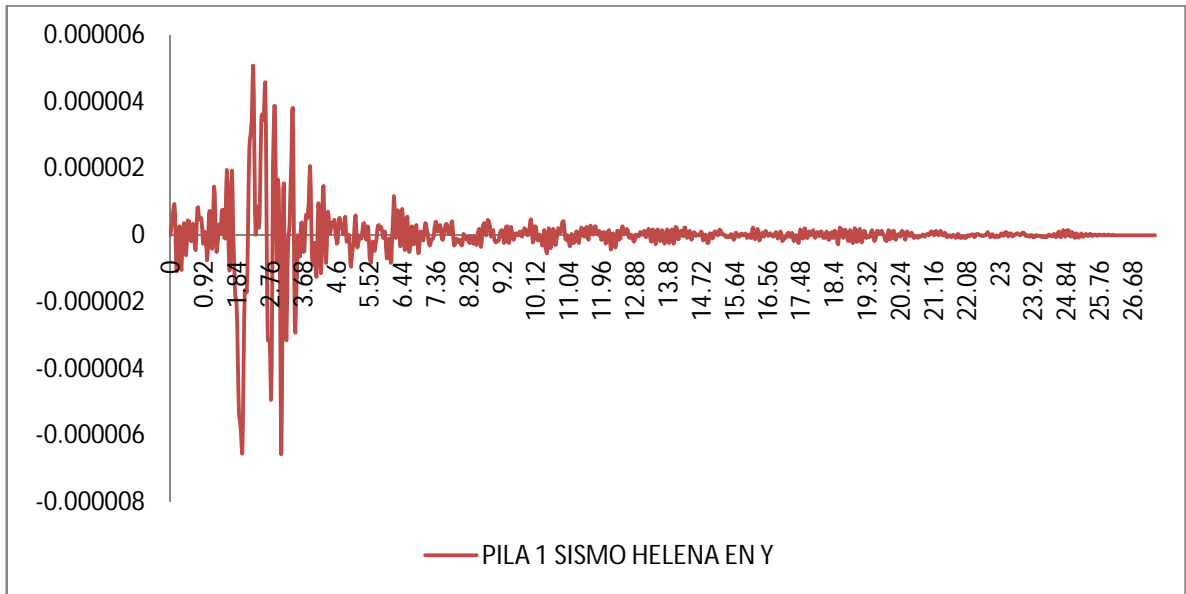


Ilustración 57: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección y.

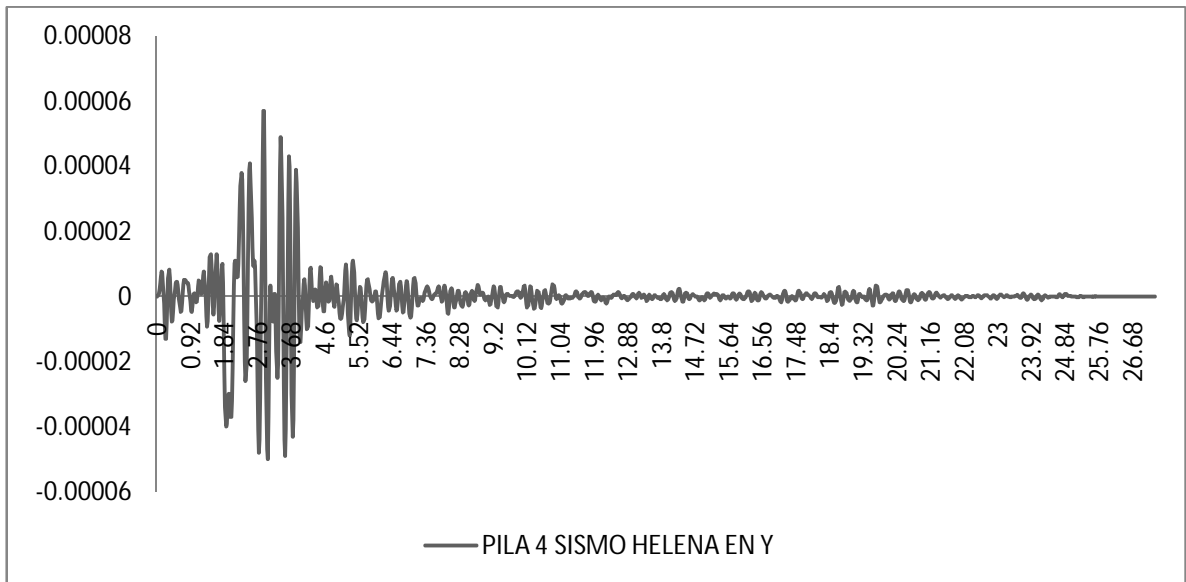


Ilustración 58: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Helena aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

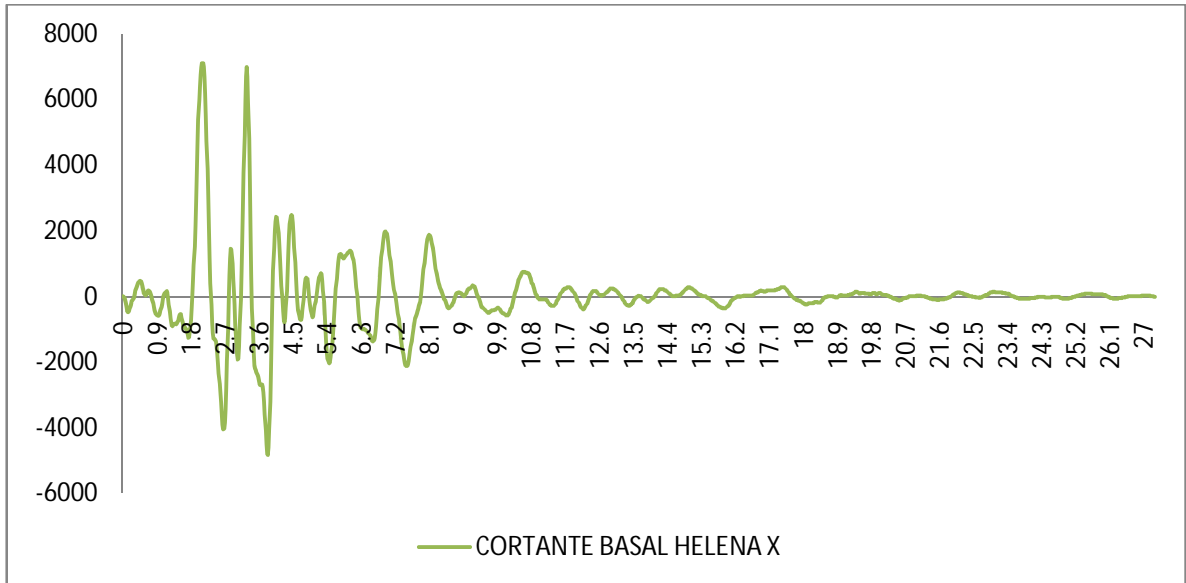


Ilustración 59: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Helena en dirección x

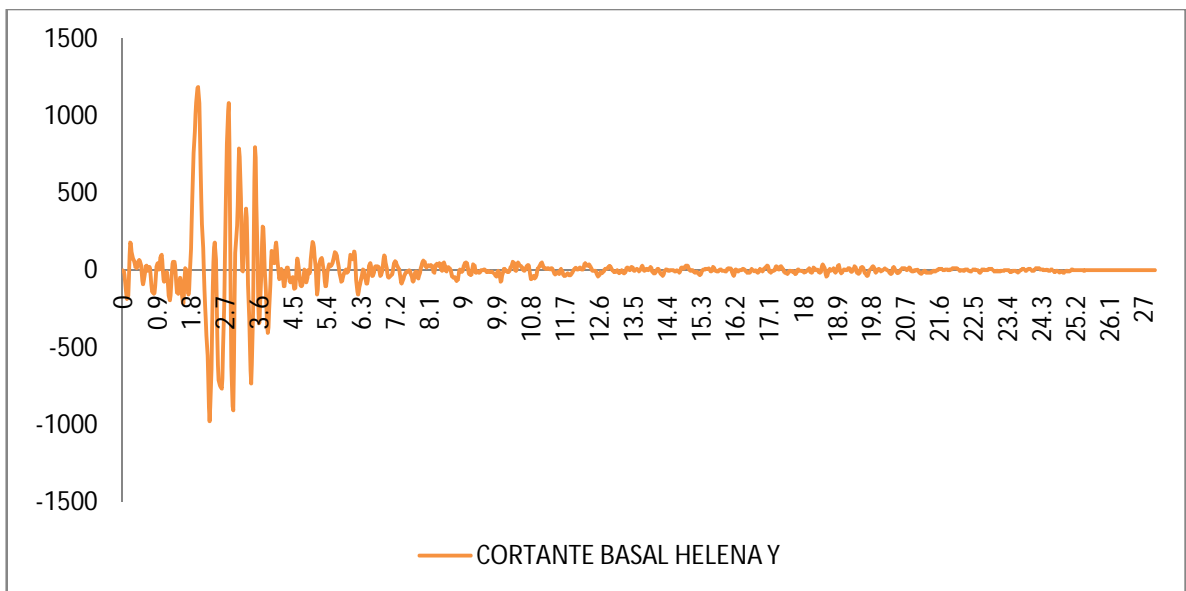


Ilustración 60: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Helena en dirección y.

5.2.5. Loma Prieta:

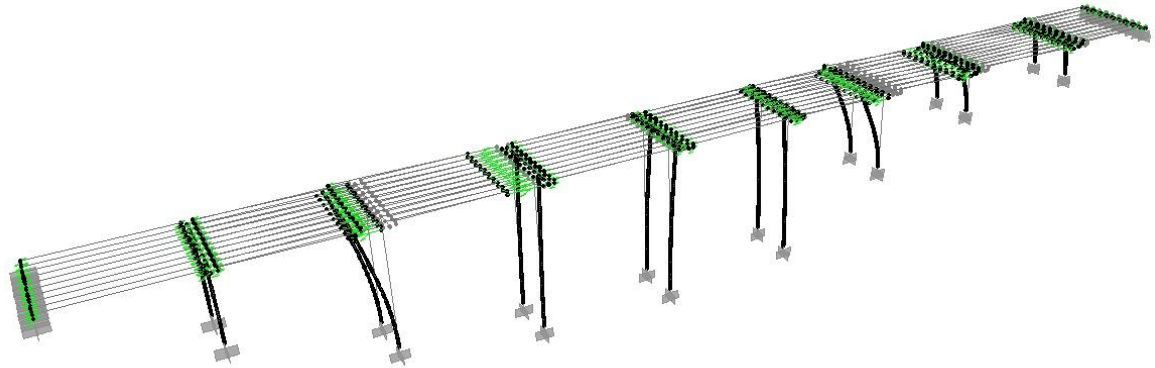


Ilustración 61: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección x (SAP 2000).

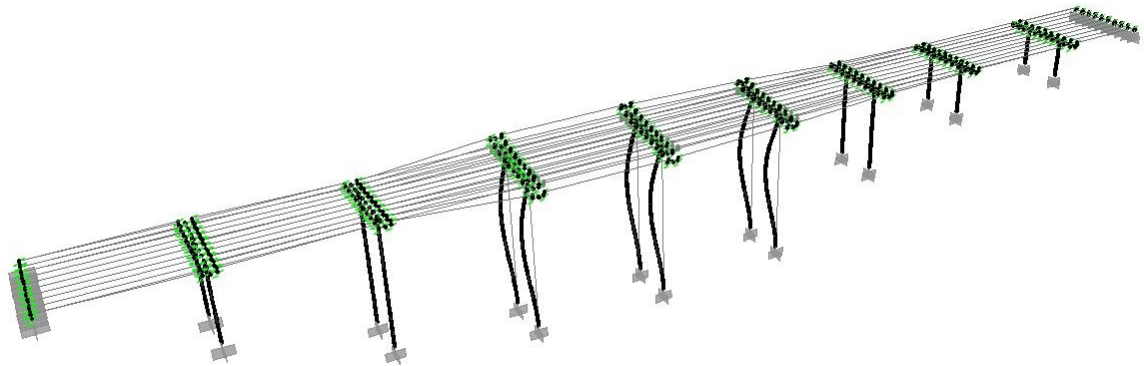


Ilustración 62: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección y (SAP 2000).

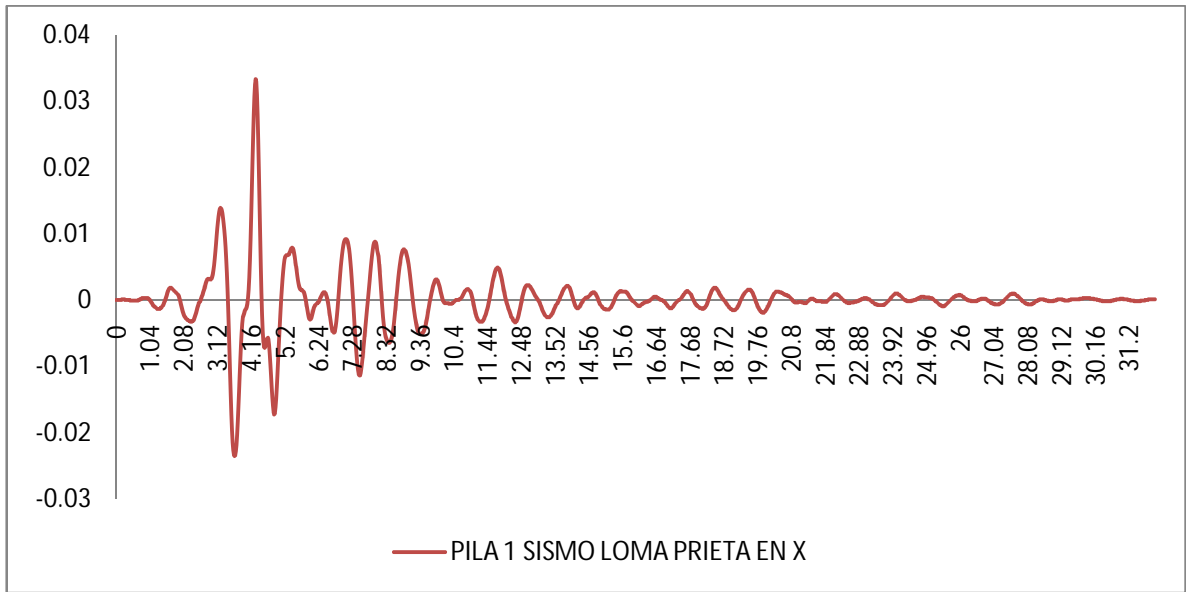


Ilustración 63: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección x.

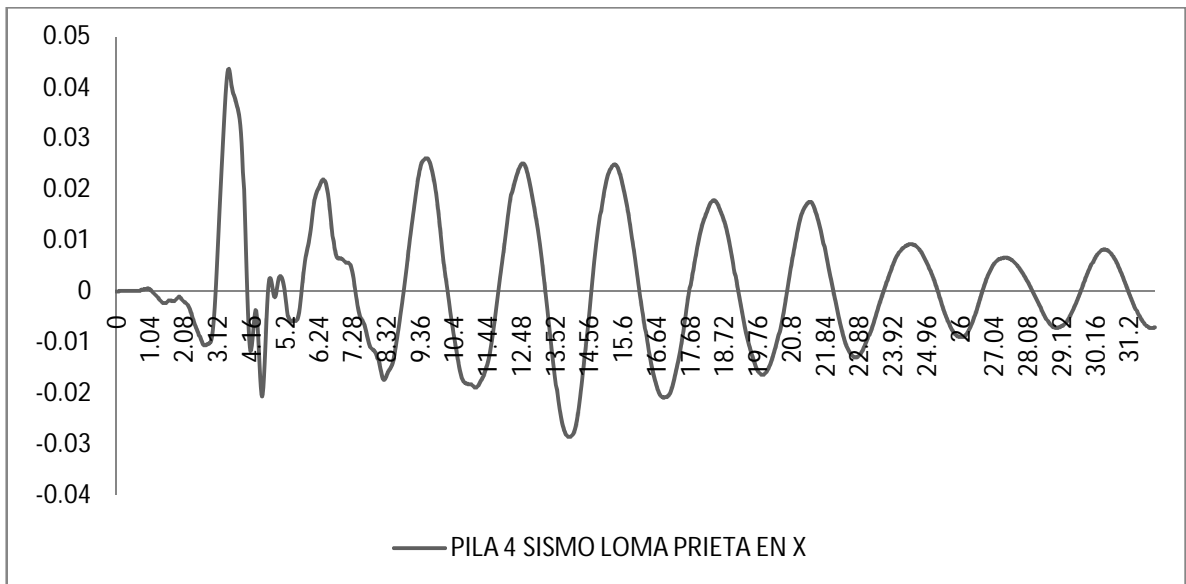


Ilustración 64: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección x.

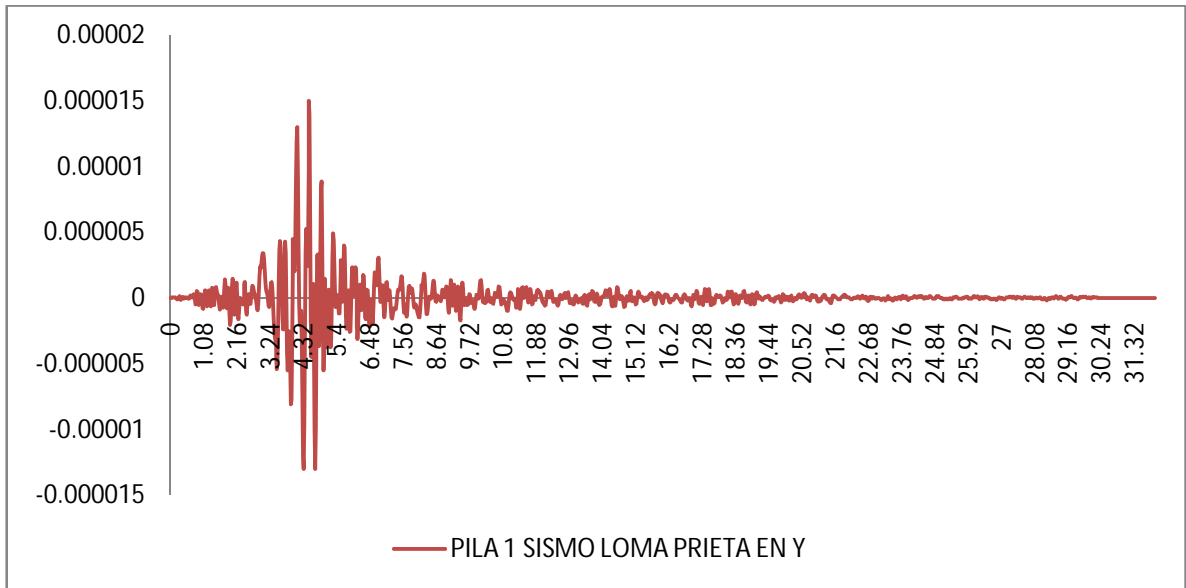


Ilustración 65: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección y.

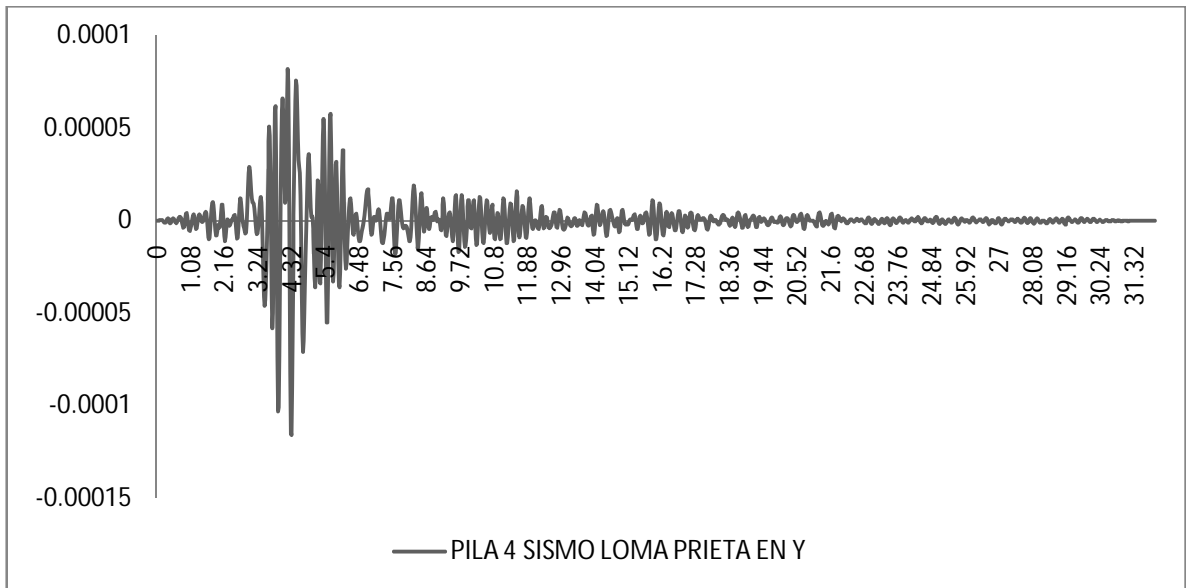


Ilustración 66: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Loma Prieta aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

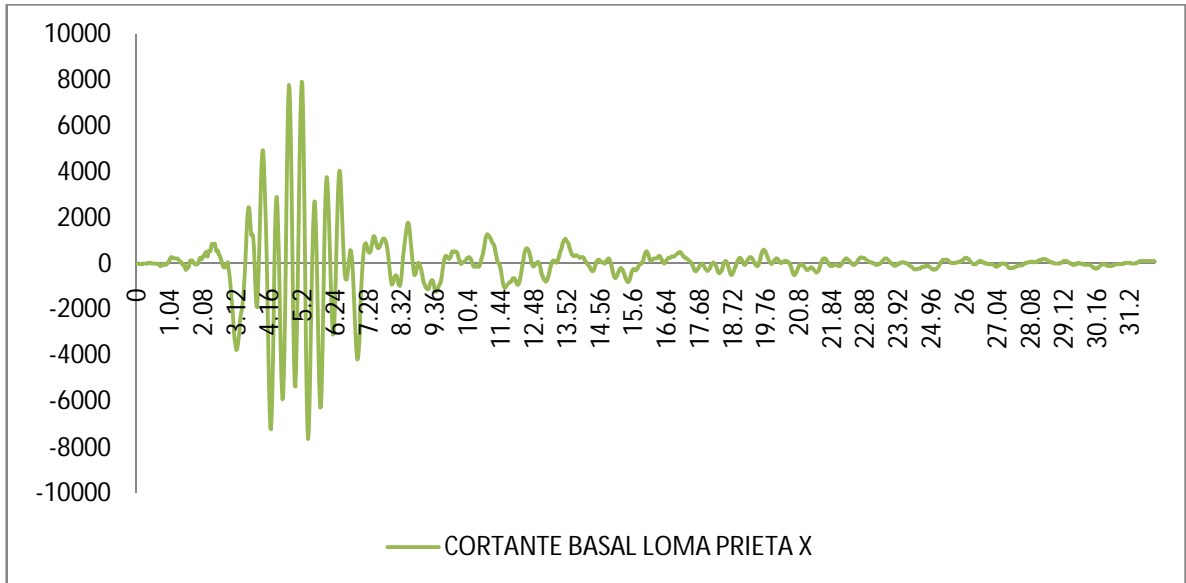


Ilustración 67: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Loma Prieta en dirección x.

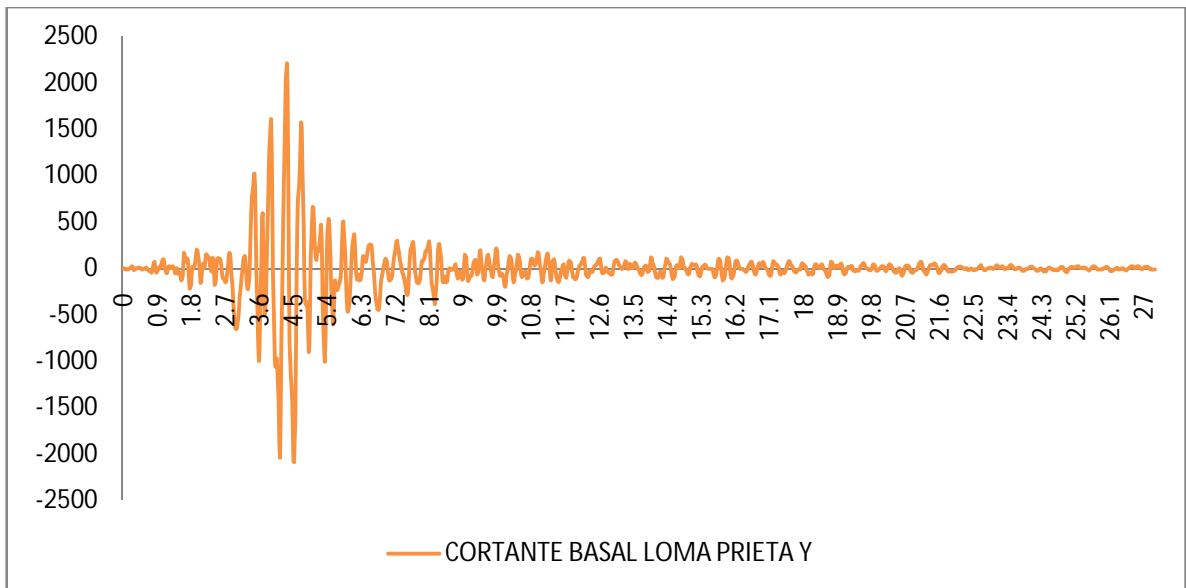


Ilustración 68: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Loma Prieta en dirección y.

5.2.6. Mammoth:

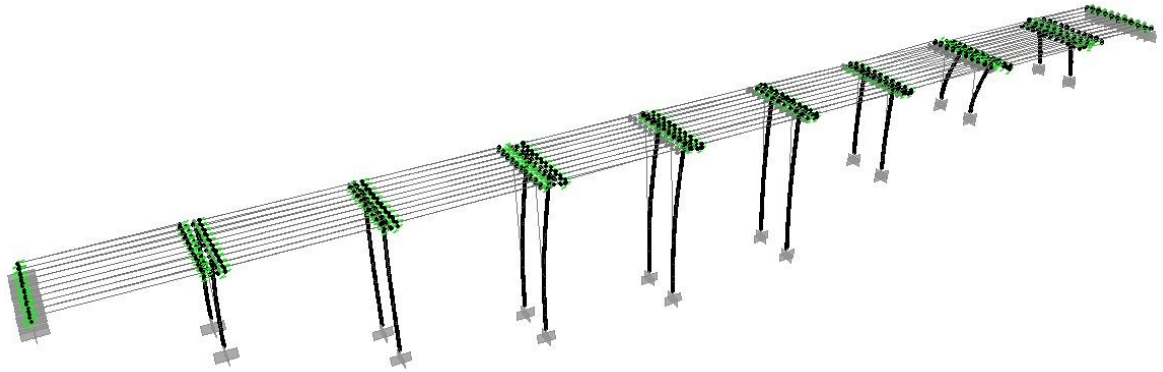


Ilustración 69: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección x (SAP 2000).

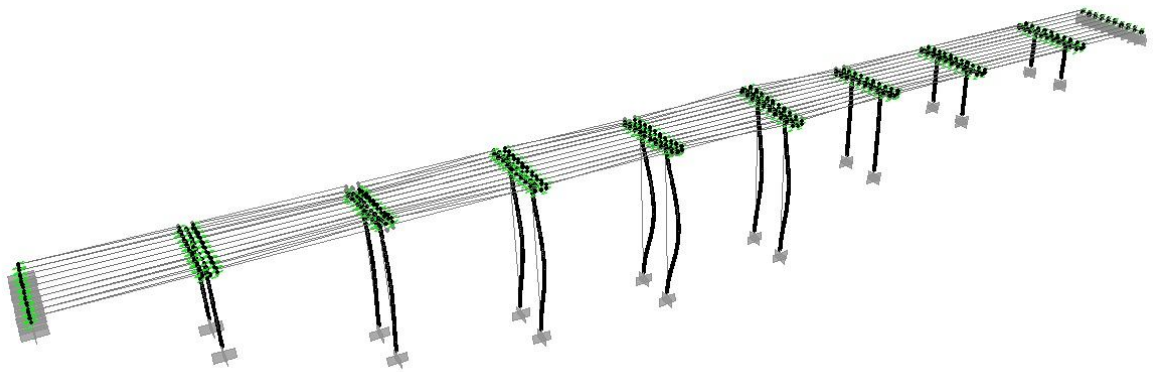


Ilustración 70: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Mammoth aplicado en dirección y (SAP 2000).

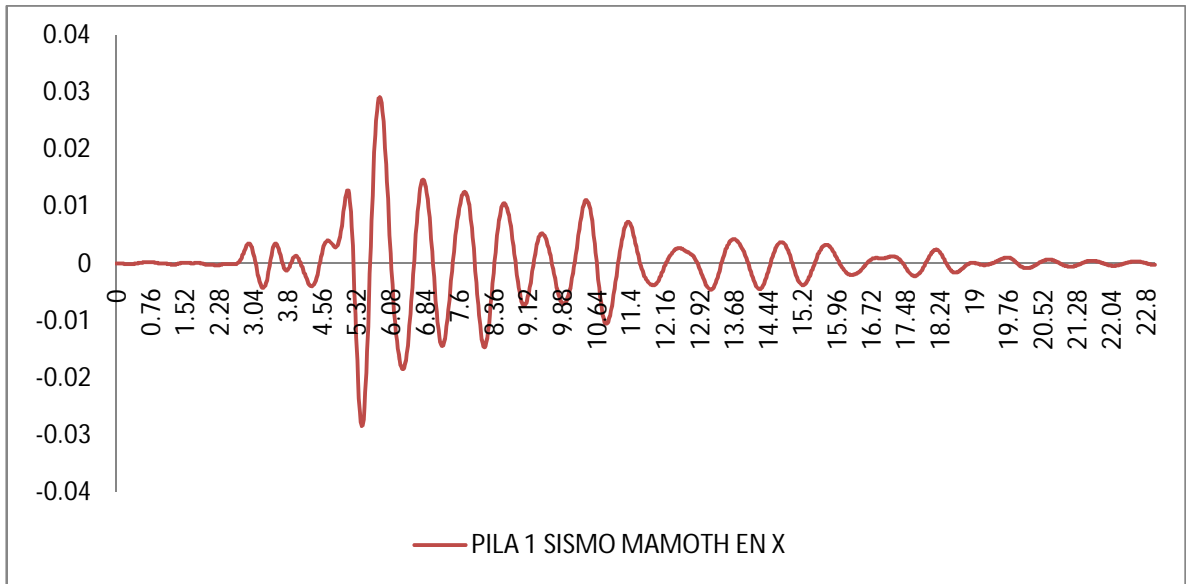


Ilustración 71: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Mamoth aplicado en dirección x.

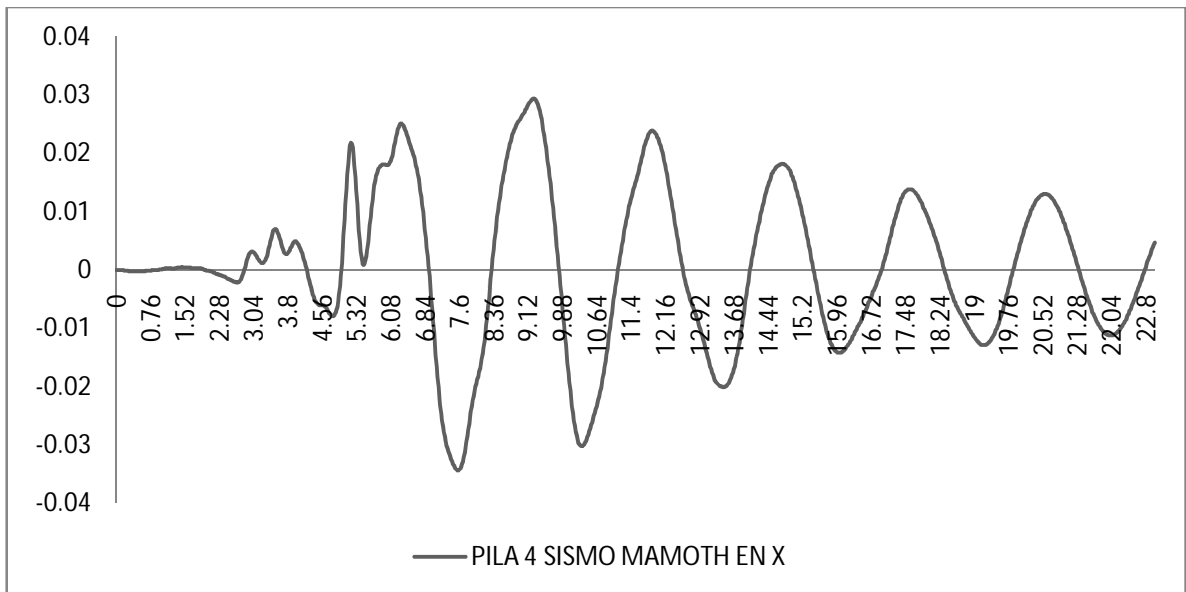


Ilustración 72: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Mamoth aplicado en dirección x.

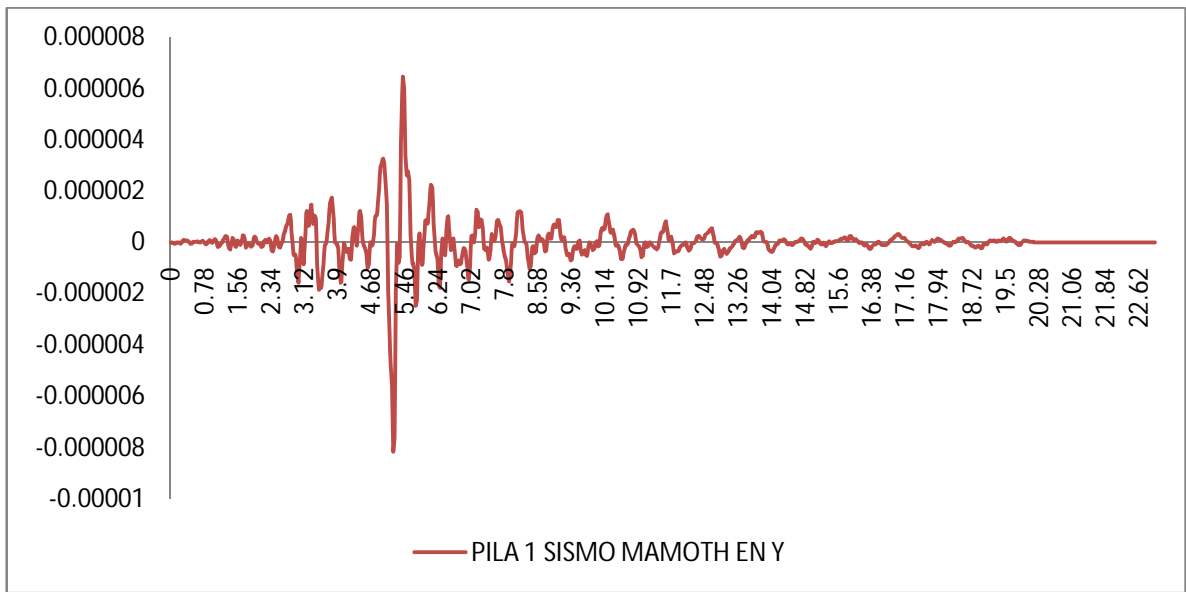


Ilustración 73: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Mamoth aplicado en dirección y.

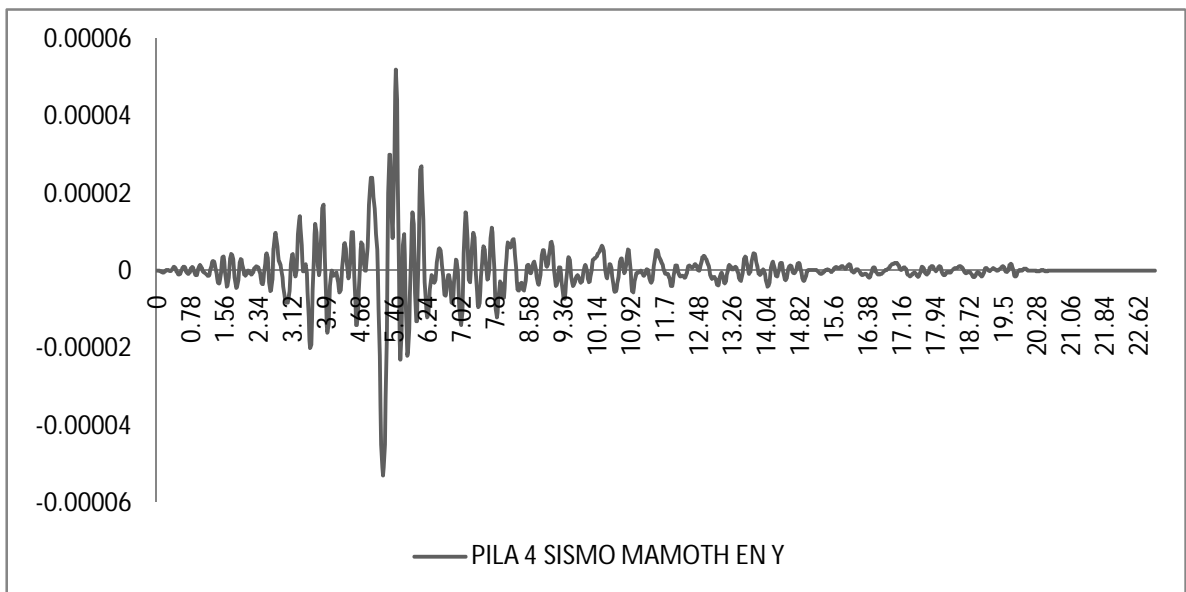


Ilustración 74: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Mamoth aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

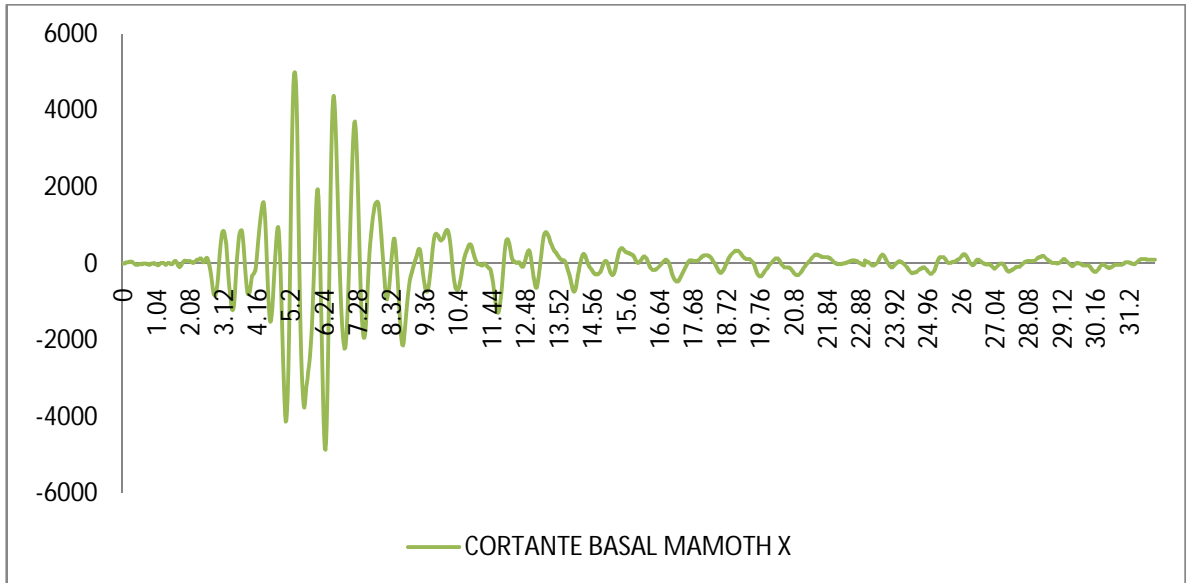


Ilustración 75: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Mammoth en dirección x.

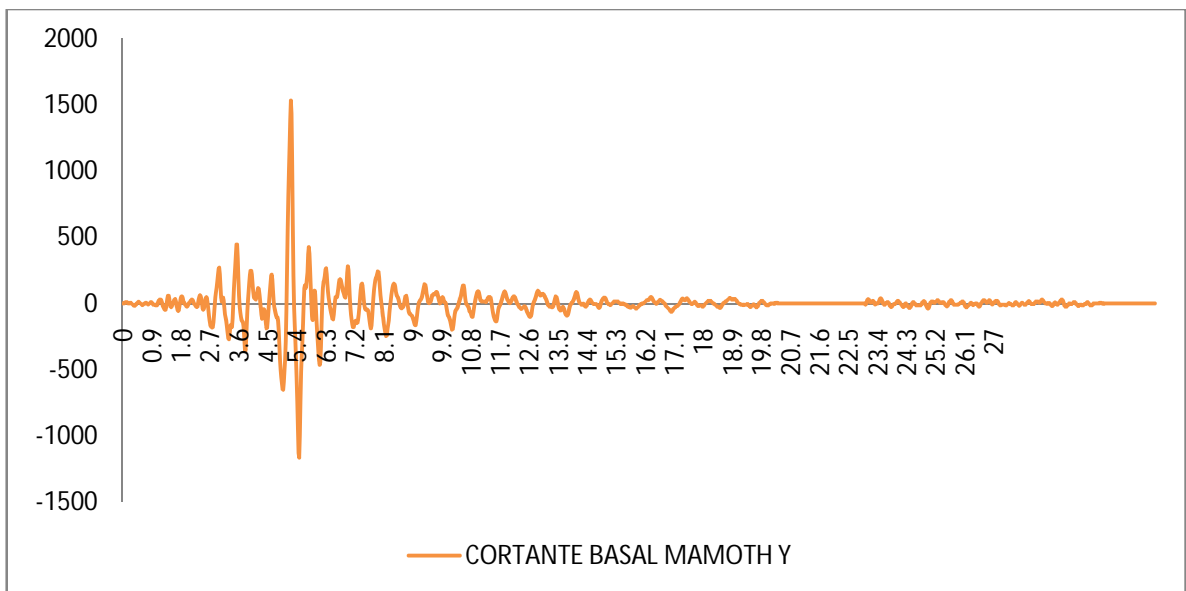


Ilustración 76: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Mammoth en dirección y.

5.2.7. Monte Negro:

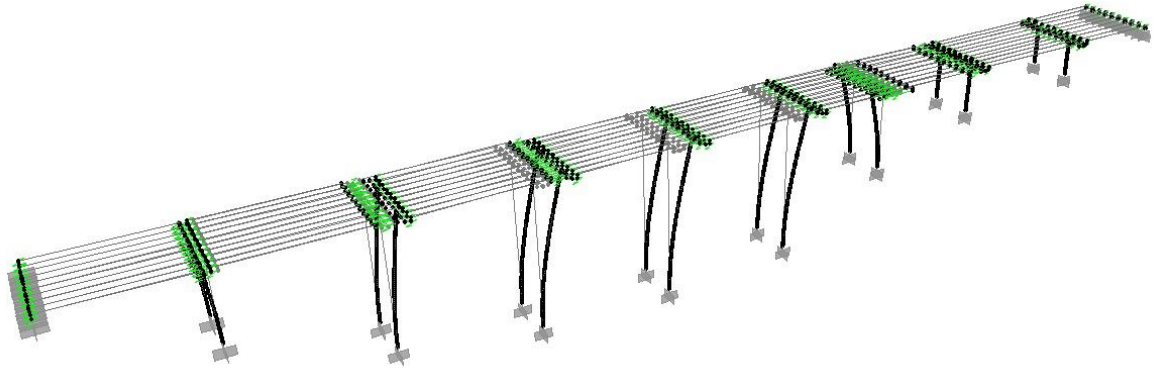


Ilustración 77: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección x (SAP 2000).

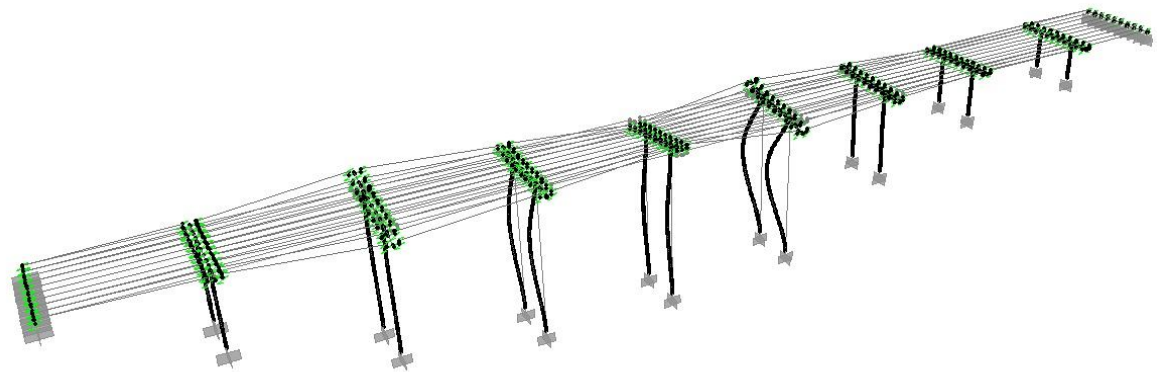


Ilustración 78: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección y (SAP 2000).

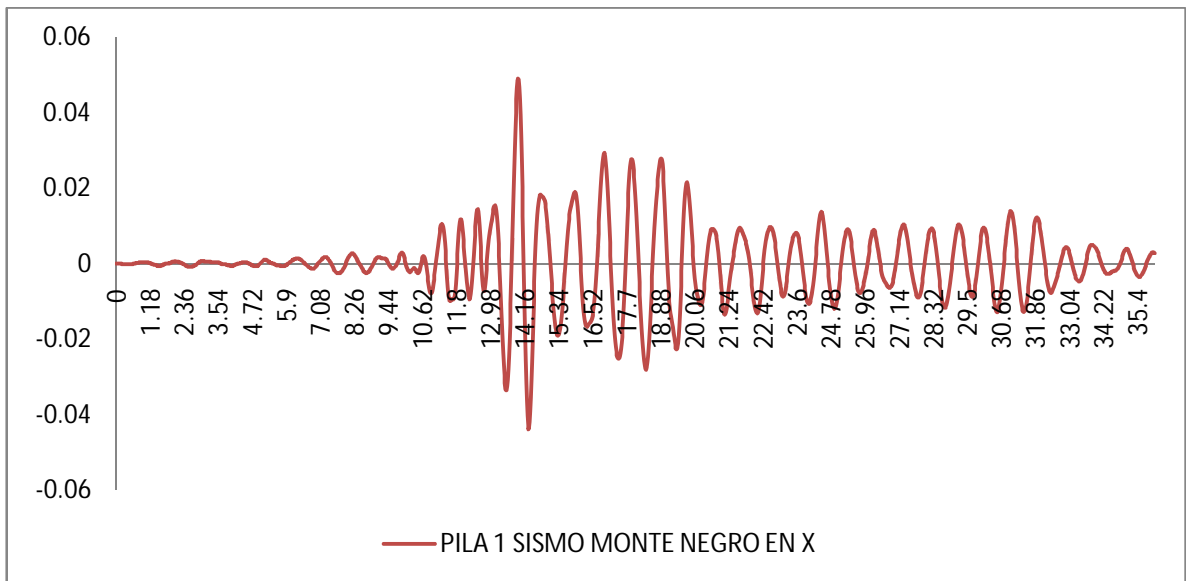


Ilustración 79: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección x.

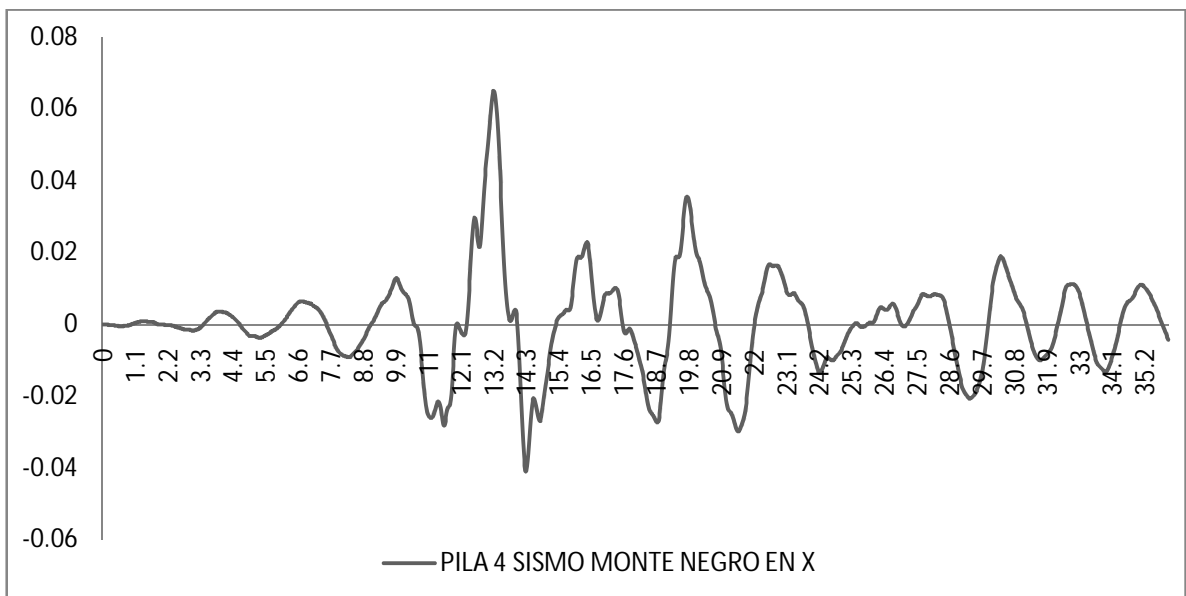


Ilustración 80: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección x.

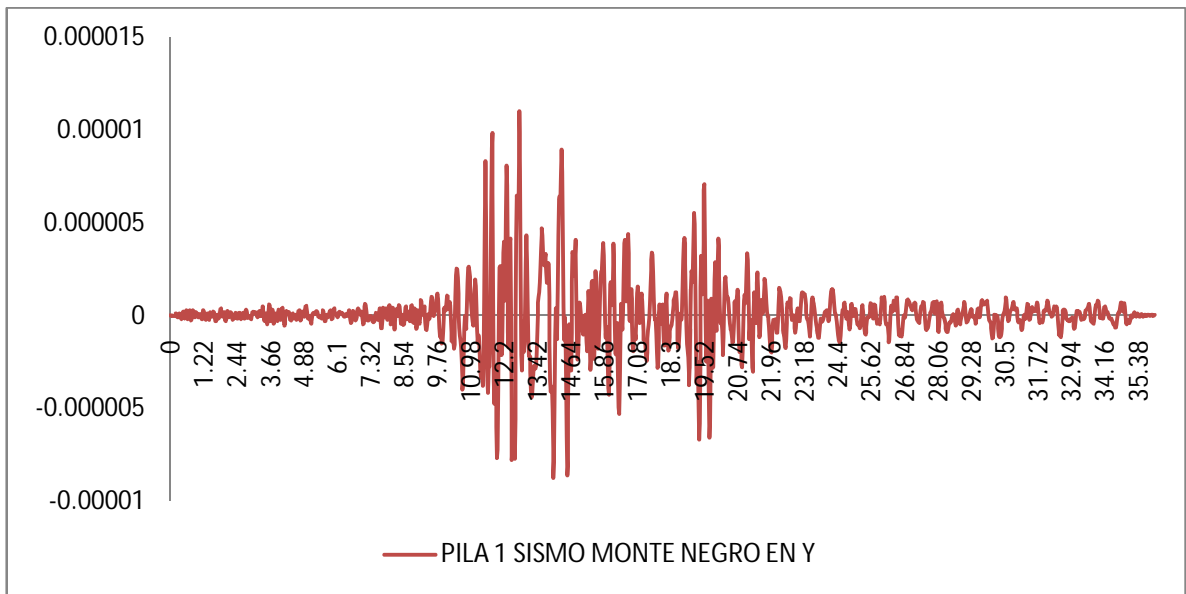


Ilustración 81: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección y.

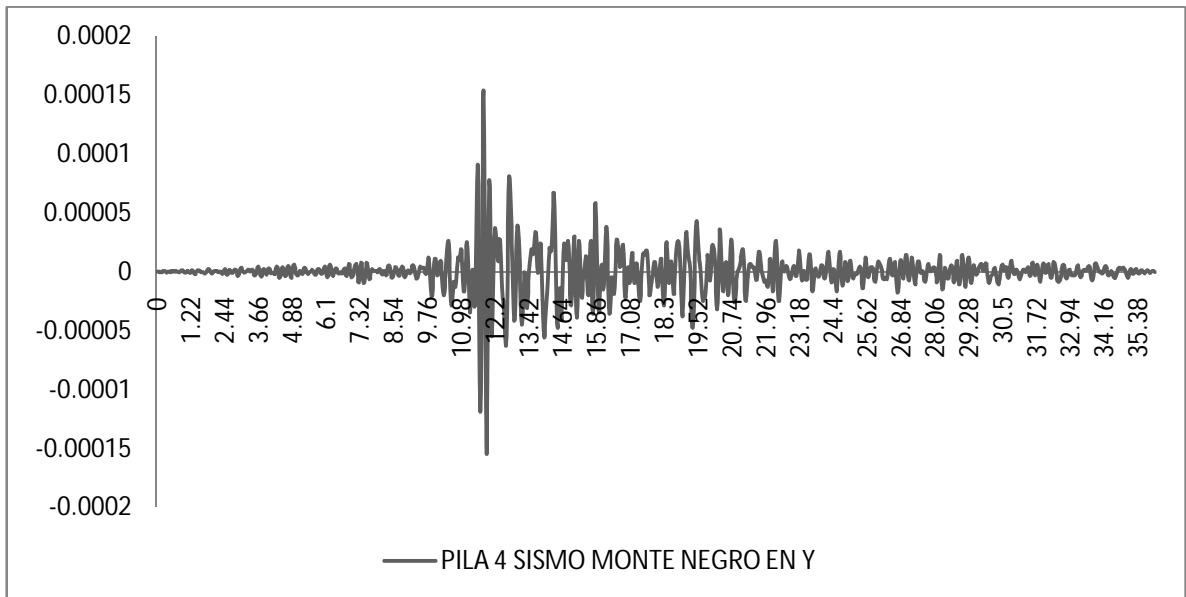


Ilustración 82: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Monte Negro aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

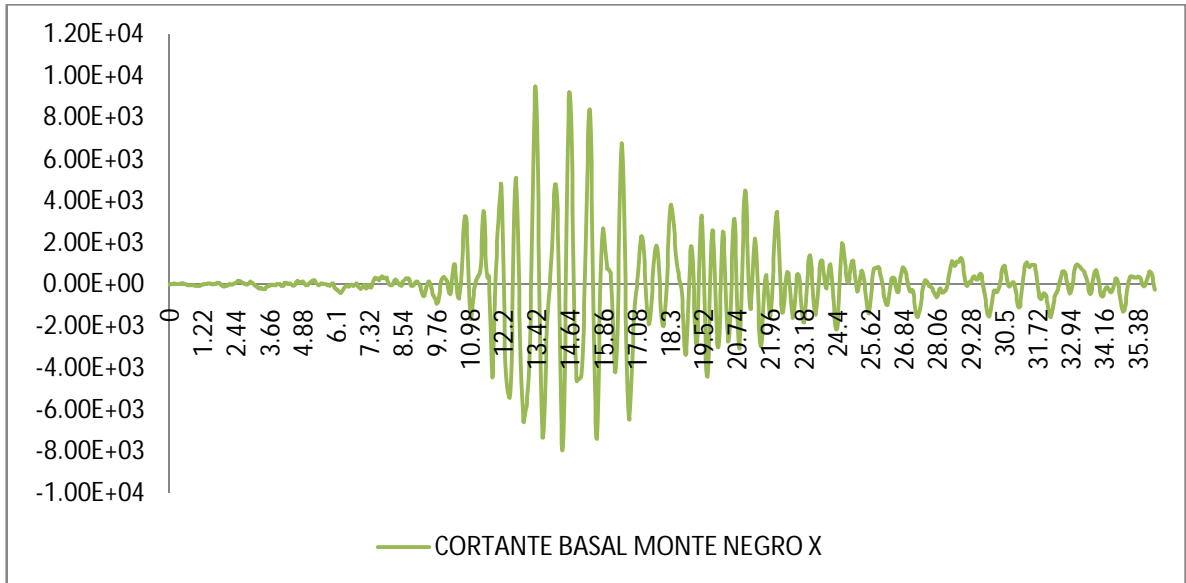


Ilustración 83: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Monte Negro en dirección x.

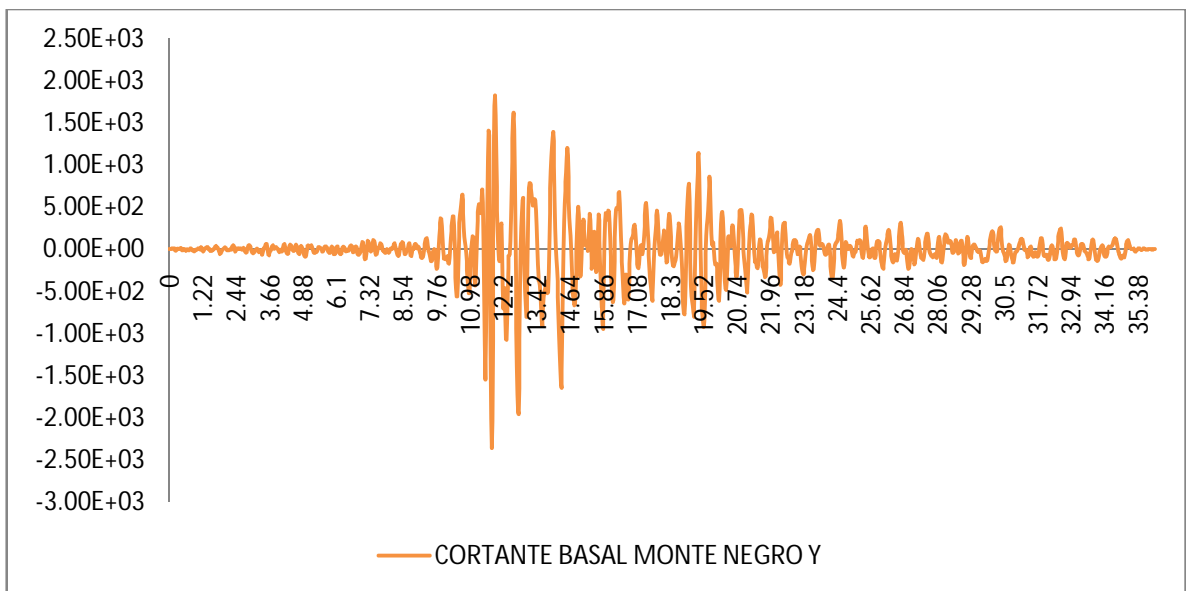


Ilustración 84: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Monte Negro en dirección y.

5.2.8. Pretolia:

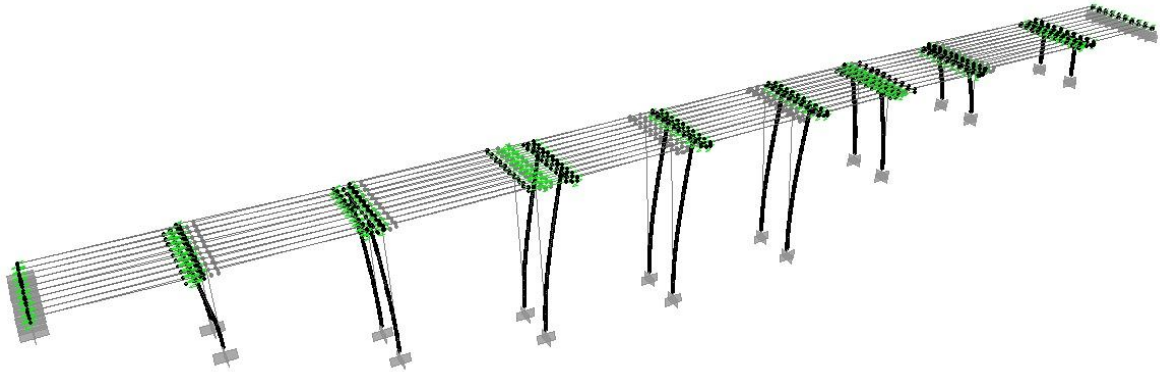


Ilustración 85: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección x (SAP 2000).

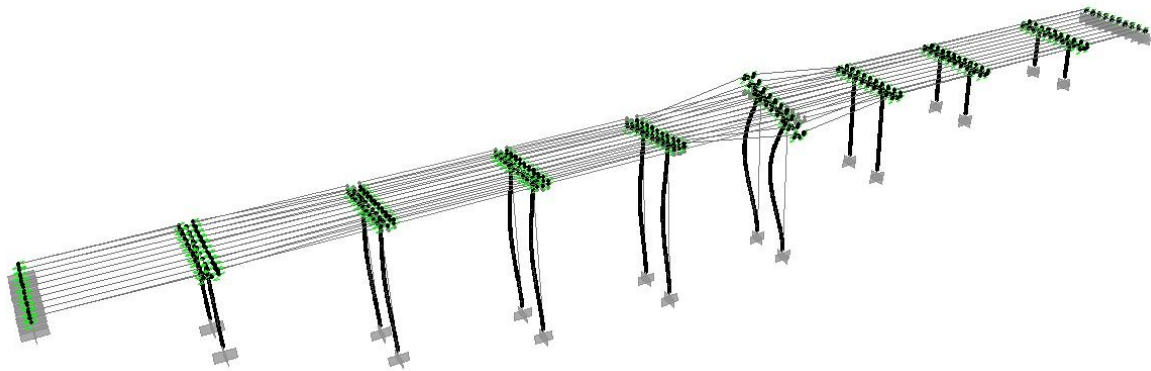


Ilustración 86: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección y (SAP 2000).

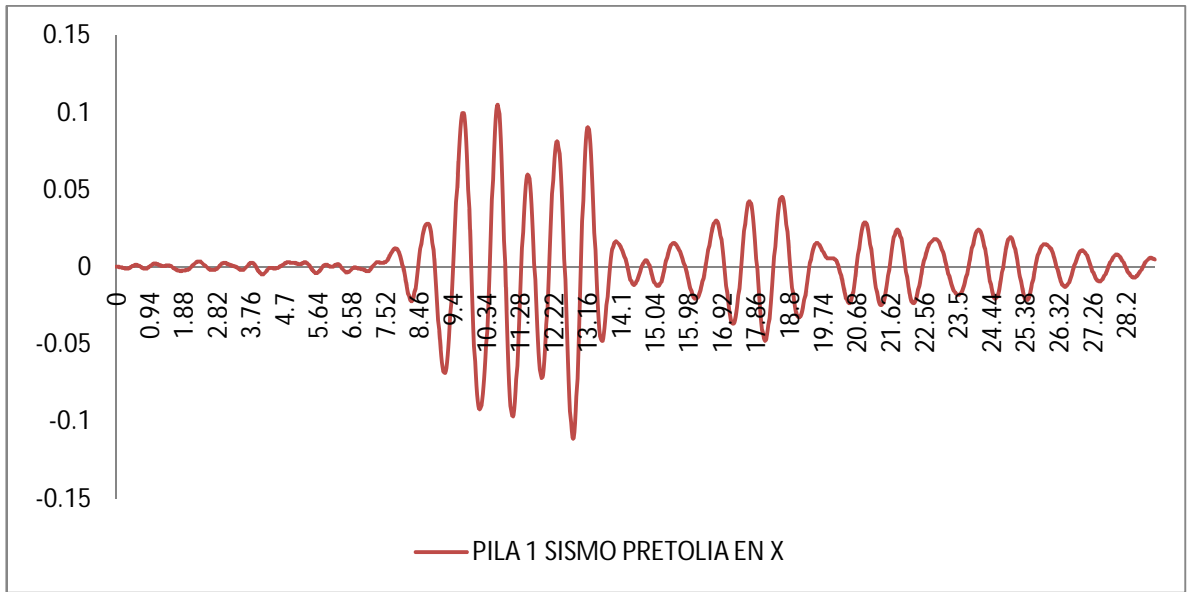


Ilustración 87: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección x.

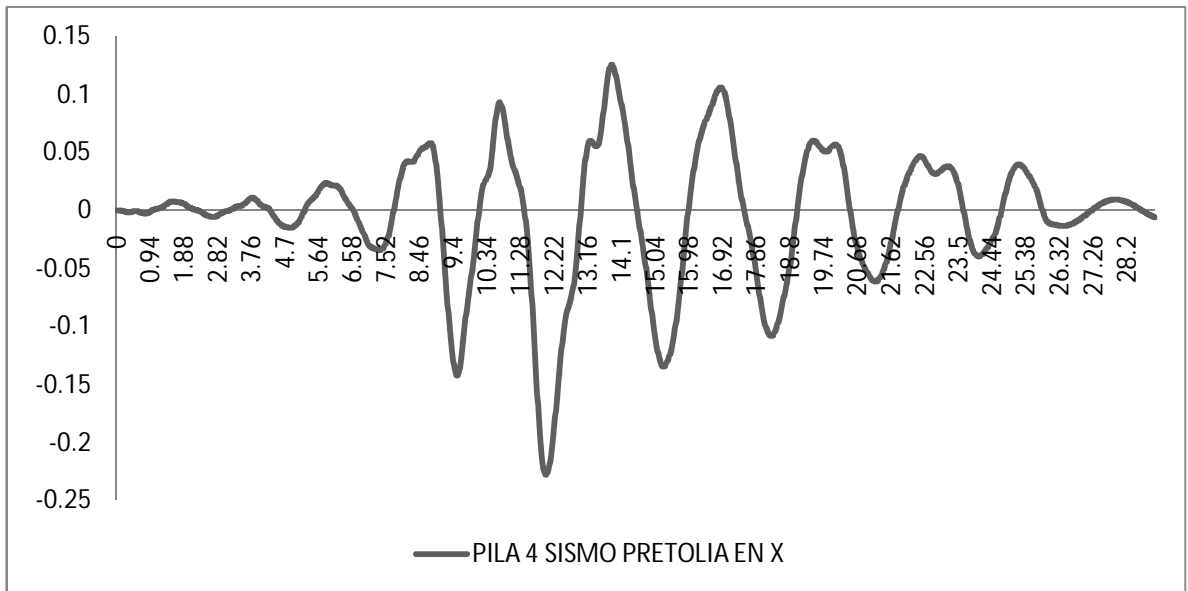


Ilustración 88: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección x.

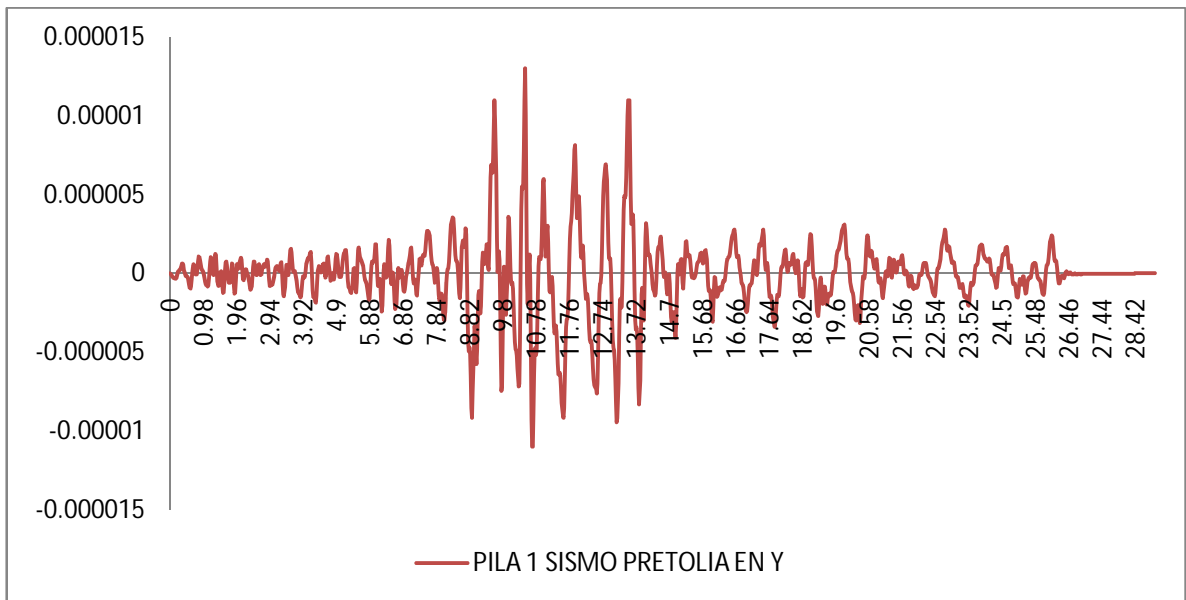


Ilustración 89: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección y.

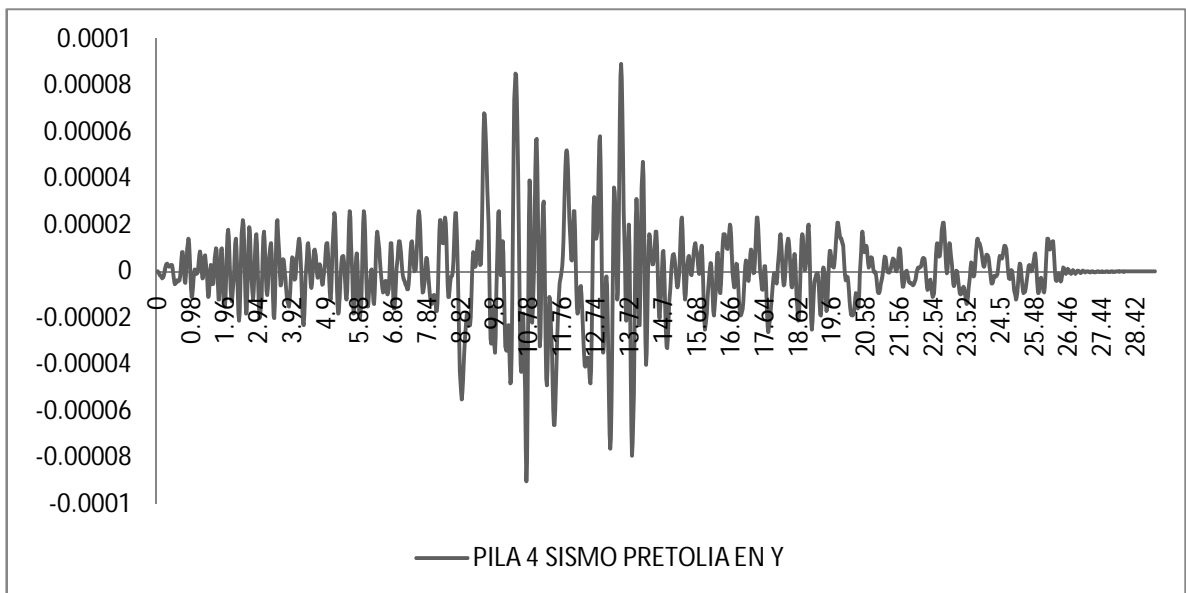


Ilustración 90: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Pretolia aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

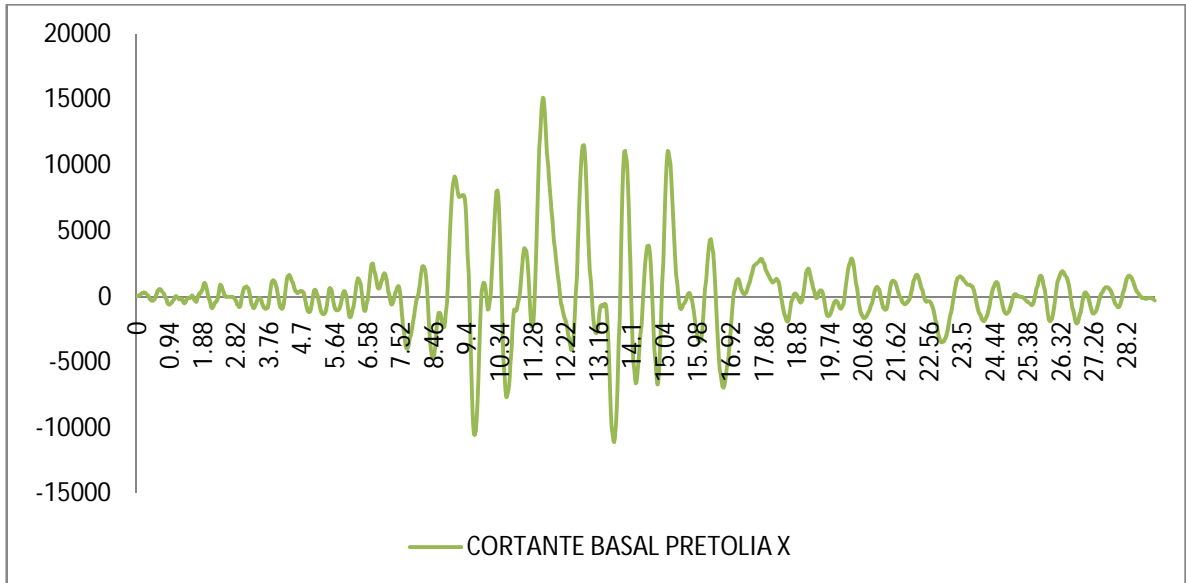


Ilustración 91: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Pretolia en dirección x.

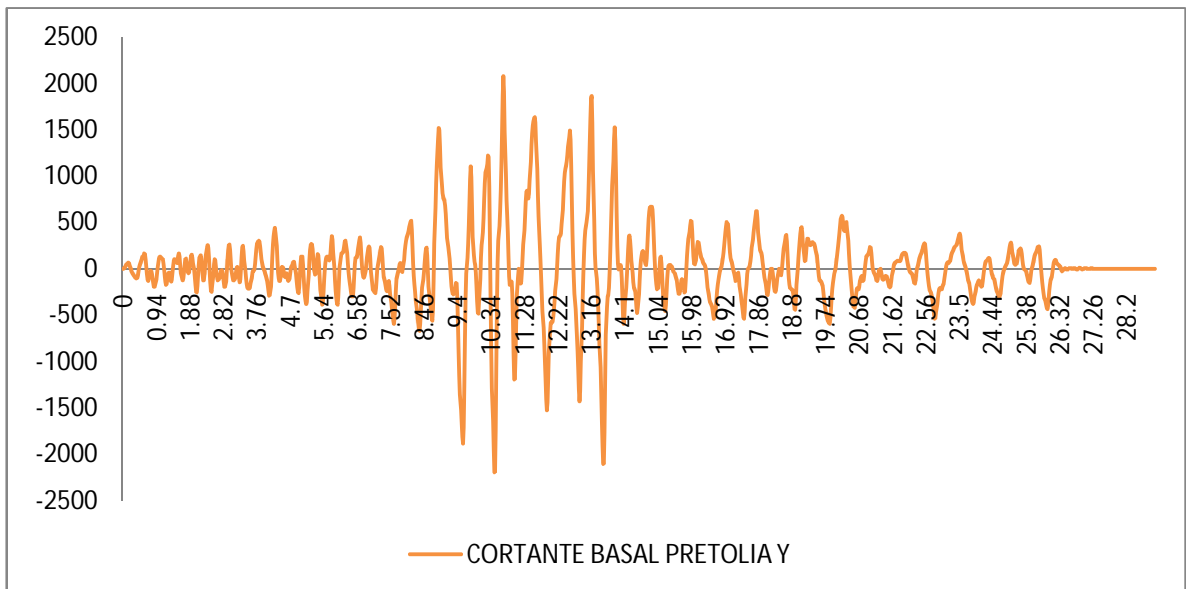


Ilustración 92: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Pretolia en dirección y.

5.2.9. Umbria:

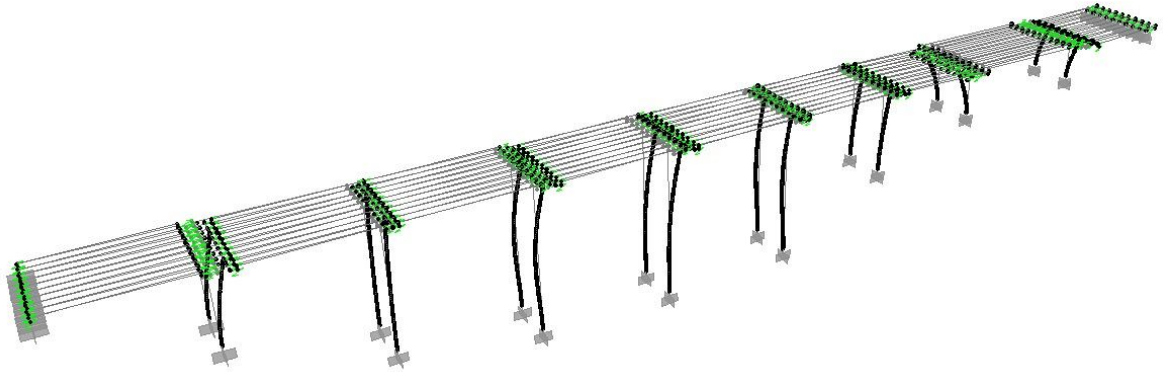


Ilustración 93: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Umbria aplicado en dirección x (SAP 2000).

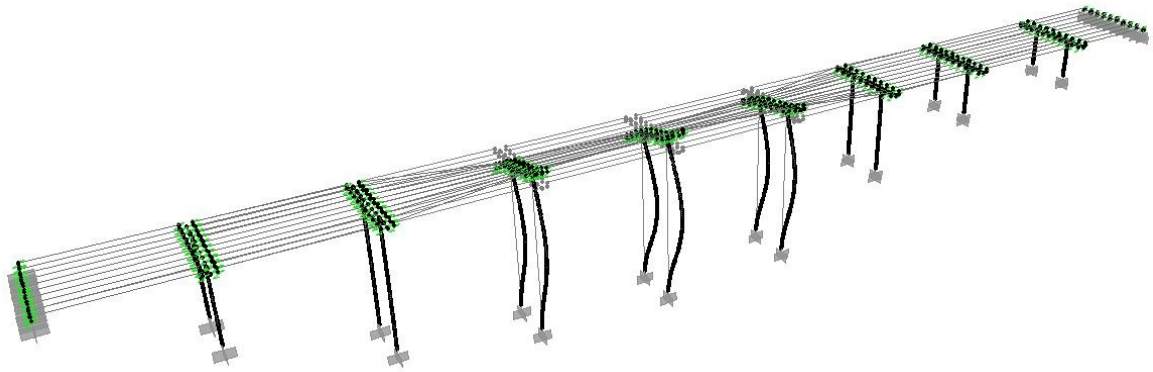


Ilustración 94: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Umbria aplicado en dirección y (SAP 2000).

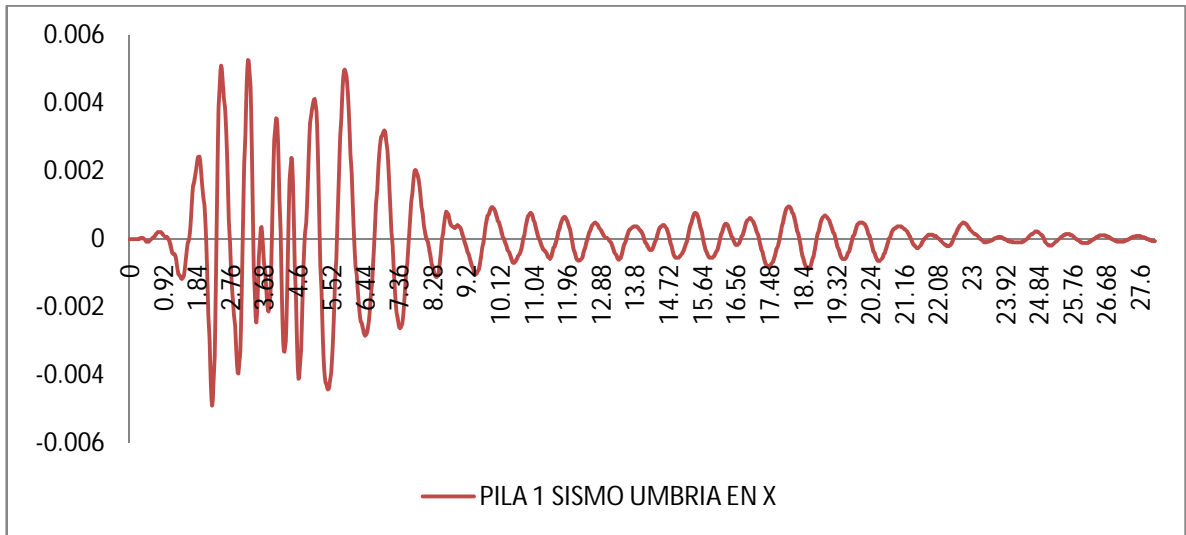


Ilustración 95: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección x.

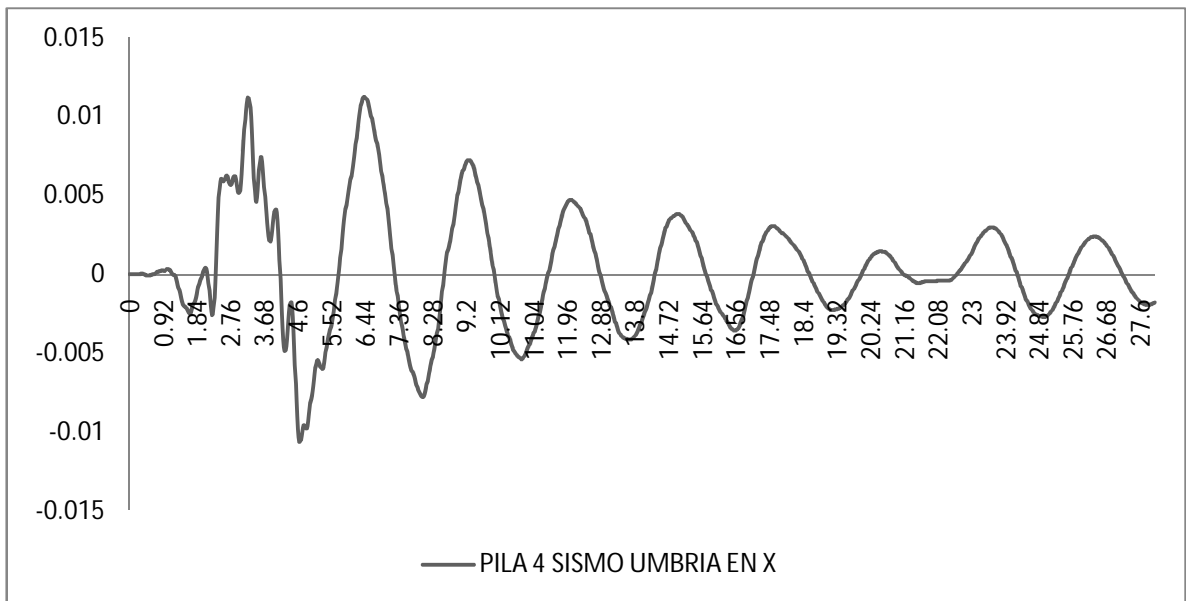


Ilustración 96: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección x.

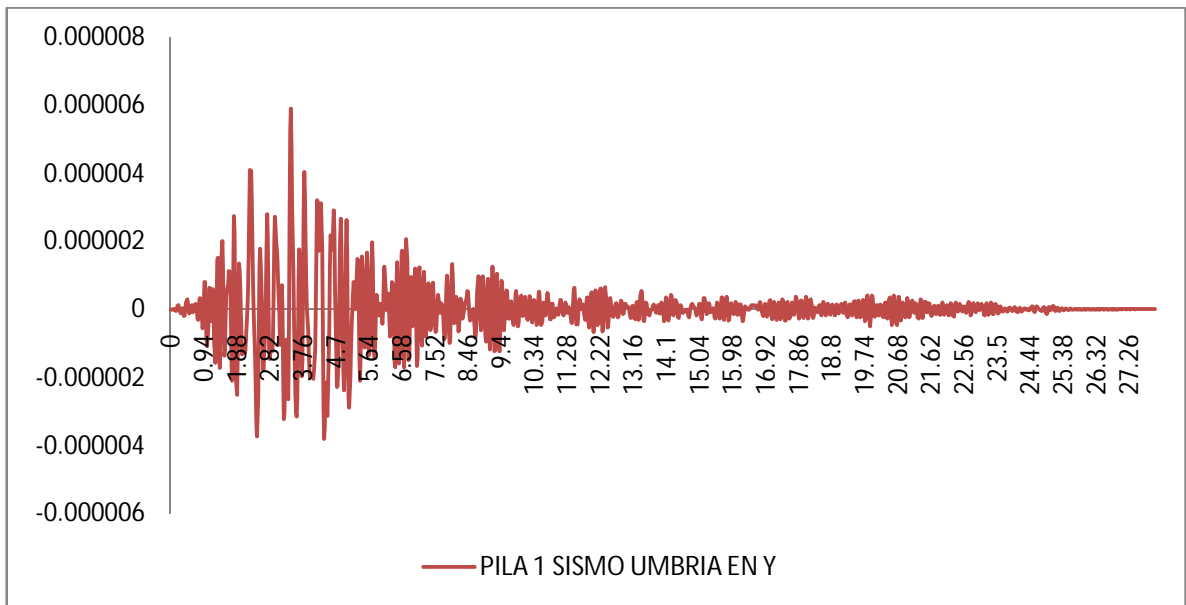


Ilustración 97: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección y.

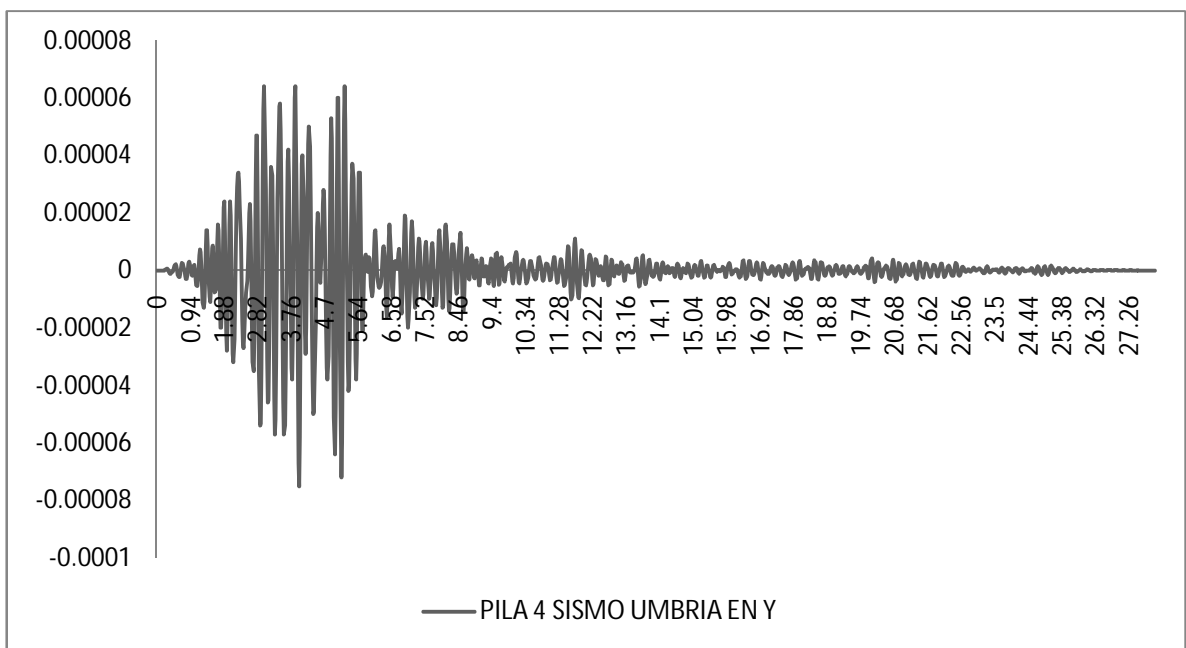


Ilustración 98: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Umbria aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas durante la duración del sismo:

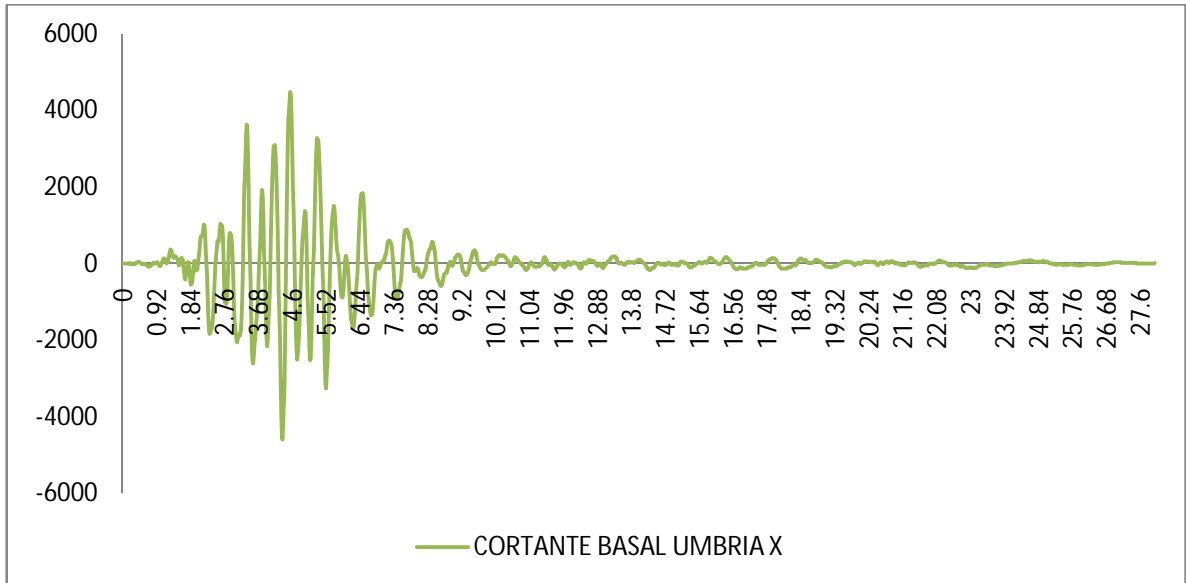


Ilustración 99: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Umbria en dirección x.

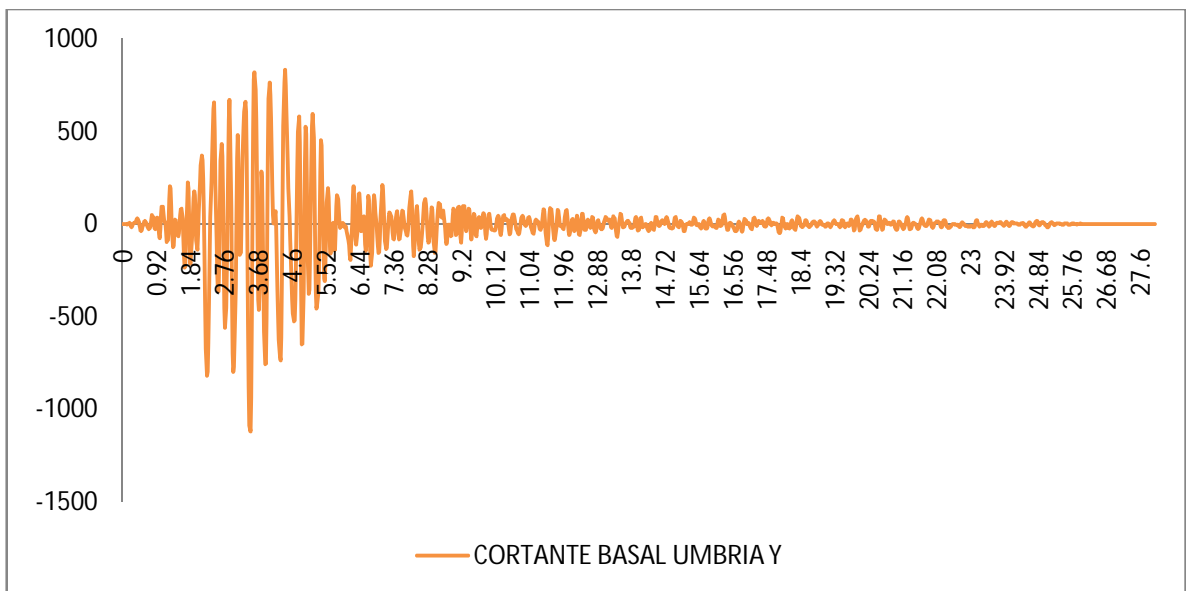


Ilustración 100: Gráfica comportamiento del cortante en la base bajo acción del sismo Umbria en dirección y.

5.2.10. Whittier:

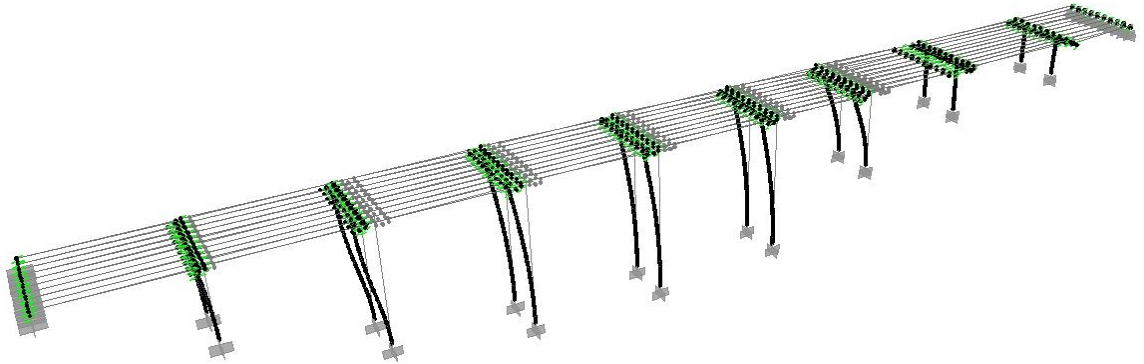


Ilustración 101: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Whittier aplicado en dirección x (SAP 2000).

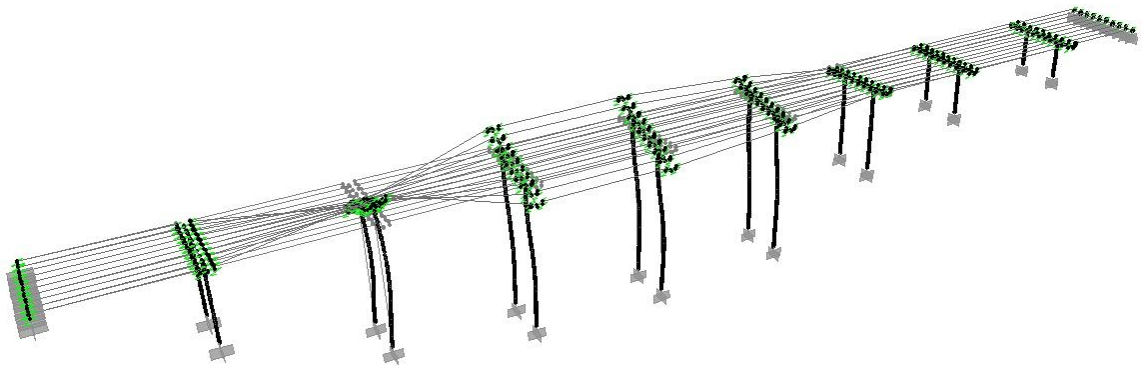


Ilustración 102: Deformación de la estructura producida por la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y (SAP 2000).

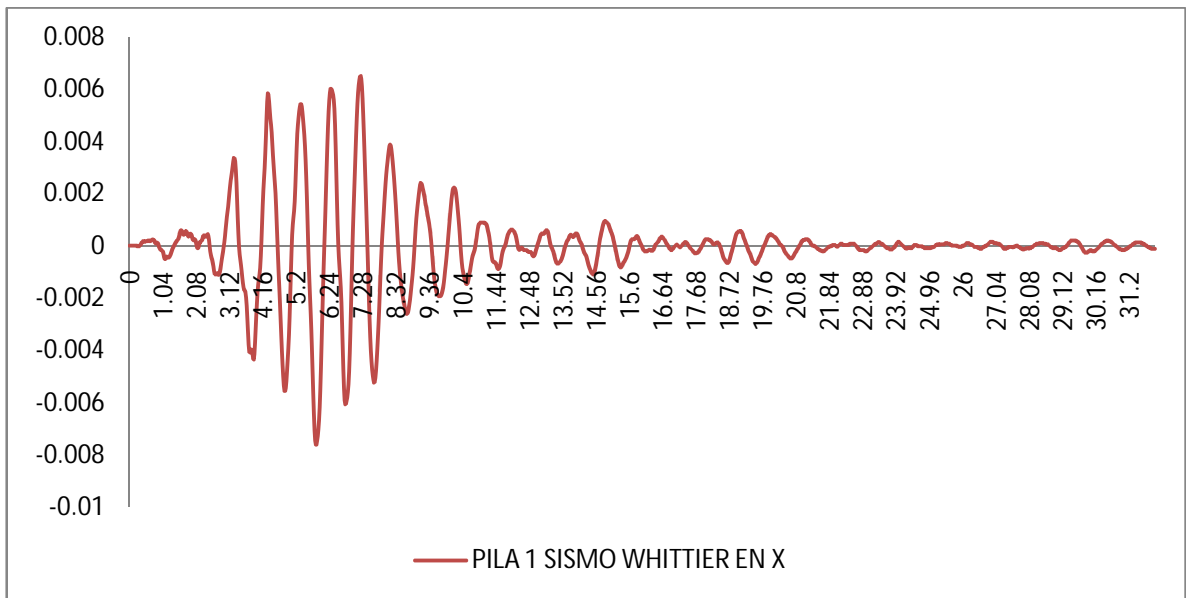


Ilustración 103: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección x.

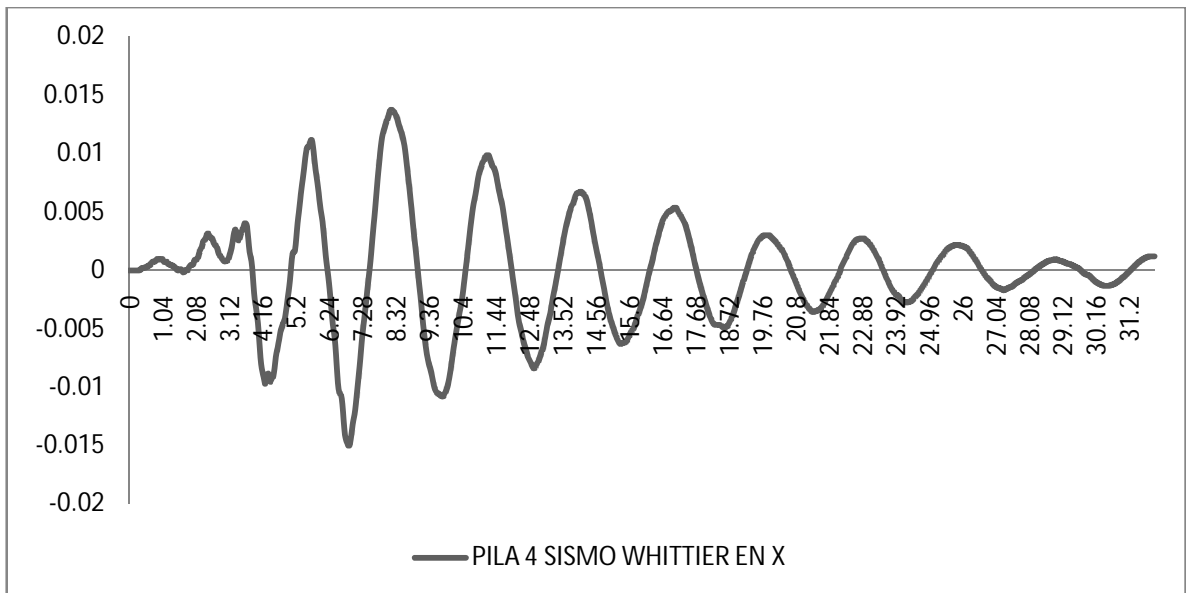


Ilustración 104: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y.

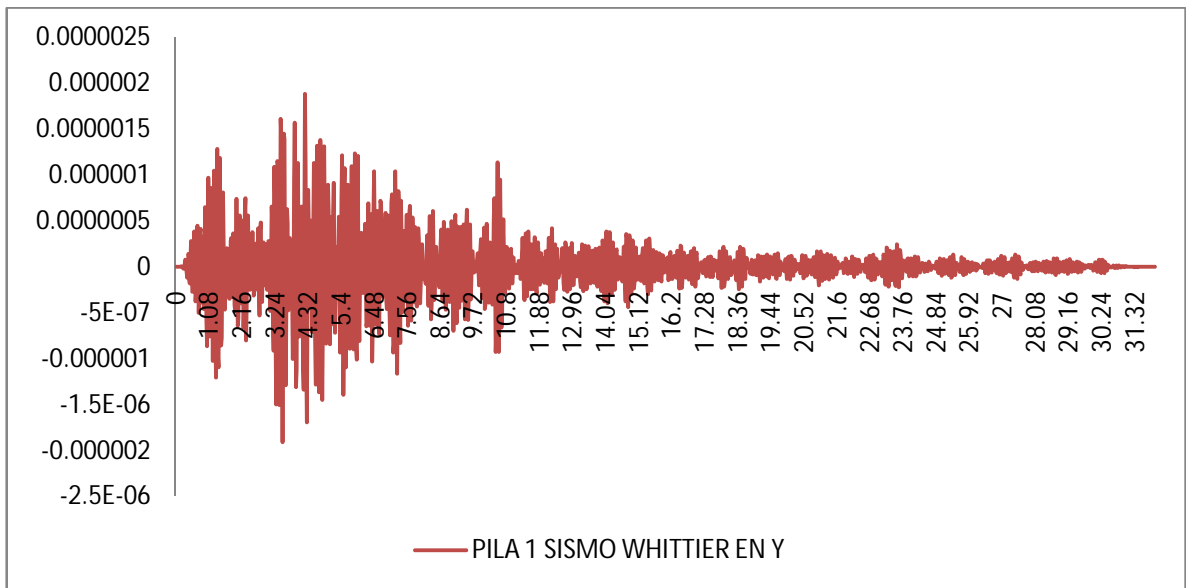


Ilustración 105: Deformaciones en el nodo de control pila 1 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y.

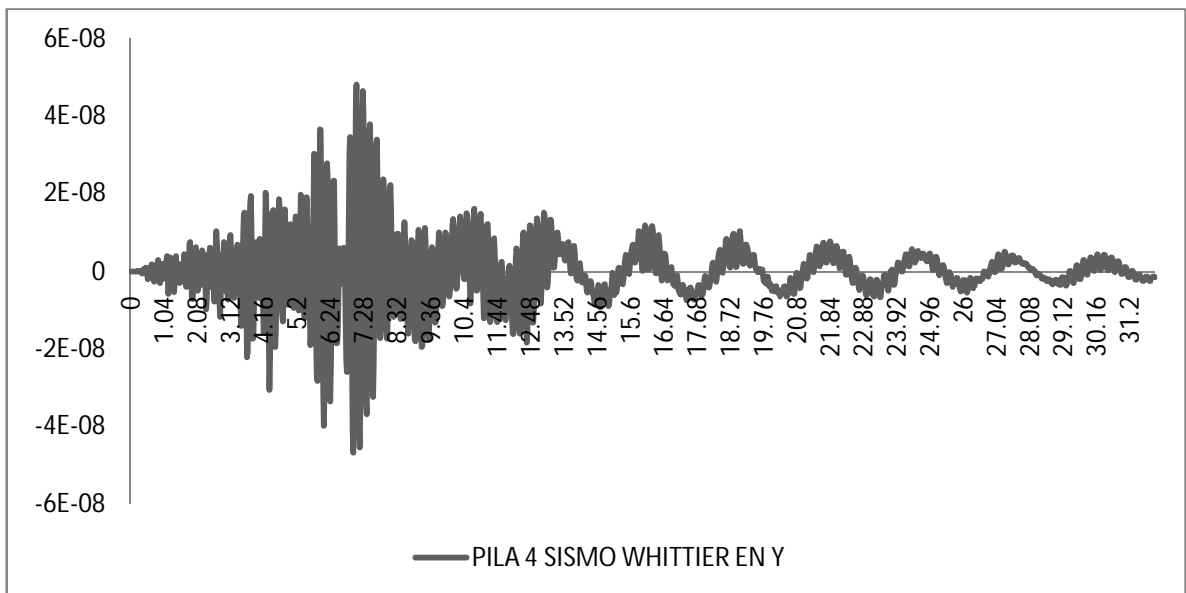


Ilustración 106: Deformaciones en el nodo de control pila 4 bajo la acción del sismo Whittier aplicado en dirección y.

A continuación se muestra las gráficas arrojadas por el programa para idealizar el comportamiento del cortante en las bases de las pilas:

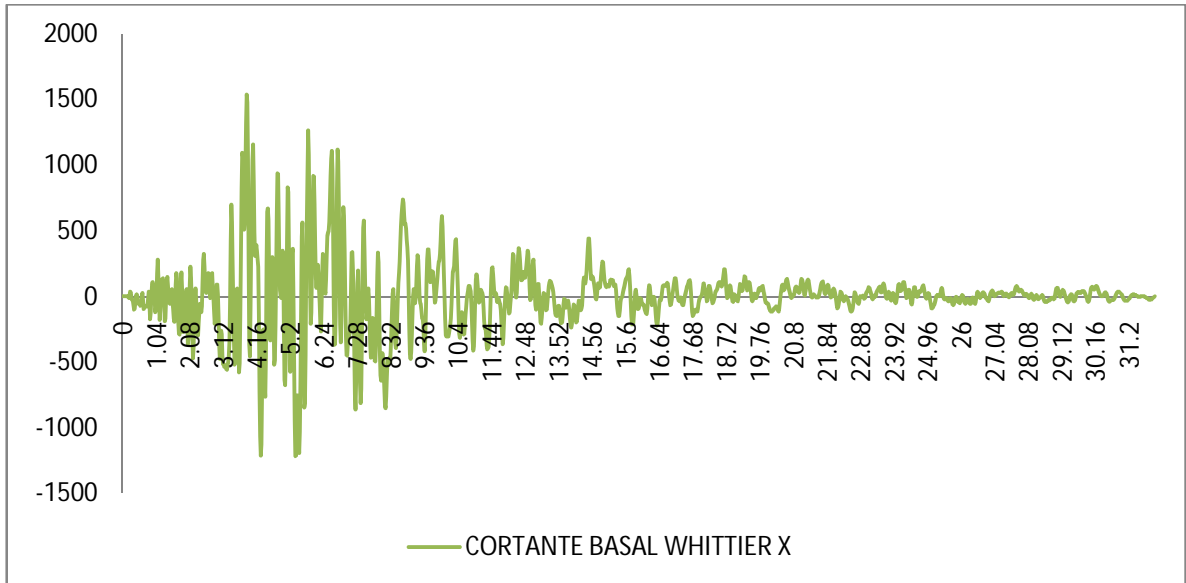


Ilustración 107: Gráfica comportamiento del cortante en la base de la pila 1 bajo acción del sismo Whittier en dirección x.

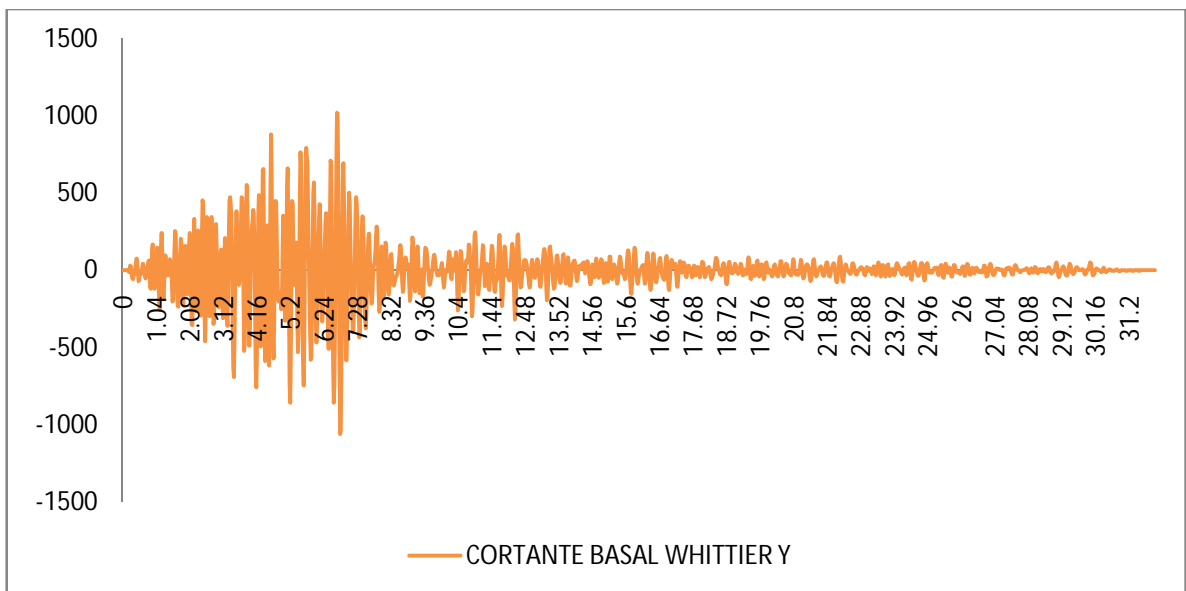


Ilustración 108: Gráfica comportamiento del cortante en la base de la pila 1 bajo acción del sismo Whittier en dirección y.

Estos son los resultados de los valores máximos de las reacciones en las ocho bases del puente:

| pila | Coaligna | Duzce | Friuli | helena | Loma Prieta | Mammoth | Monte Negro | Pretolia | Umbria | Whittier |
|------|----------|---------|---------|---------|-------------|---------|-------------|----------|---------|----------|
| 1 | 3203.49 | 1672.34 | 364.79 | 2803.13 | 1561.98 | 1578.18 | 2524.33 | 5969.09 | 3203.49 | 3203.49 |
| 2 | 396.29 | 1177.15 | 383.66 | 768.55 | 541.38 | 234.95 | 482.72 | 1623.07 | 396.29 | 396.29 |
| 3 | 277.03 | 1218.57 | 436.57 | 508.25 | 566.89 | 249.15 | 672.46 | 1306.13 | 277.03 | 277.03 |
| 4 | 277.73 | 1229.89 | 415.19 | 480.28 | 526.58 | 245.81 | 770.20 | 1194.12 | 277.73 | 277.73 |
| 5 | 325.89 | 1097.73 | 411.99 | 553.77 | 579.91 | 244.82 | 571.20 | 1458.29 | 325.89 | 325.89 |
| 6 | 1983.76 | 1129.32 | 255.26 | 2196.74 | 1497.61 | 781.97 | 1251.33 | 5282.26 | 1983.76 | 1983.76 |
| 7 | 2822.21 | 3248.20 | 812.66 | 3184.66 | 3307.87 | 4661.91 | 7505.22 | 9751.47 | 2822.21 | 2822.21 |
| 8 | 1780.58 | 3124.85 | 1295.74 | 2507.66 | 7507.05 | 2849.94 | 4165.88 | 5759.01 | 1780.58 | 1780.58 |

Tabla 6: Valores de las cortantes en las bases del Viaducto La Flora para los diferentes sismos aplicados en dirección x.

| pila | Coaligna | duce | Friuli | helena | Loma Prieta | Mammoth | Monte Negro | Pretolia | Umbria | Whittier |
|------|----------|--------|--------|--------|-------------|---------|-------------|----------|--------|----------|
| 1 | 20.05 | 22.17 | 25.42 | 17.42 | 40.24 | 22.13 | 28.44 | 36.09 | 20.05 | 20.05 |
| 2 | 255.17 | 299.78 | 331.81 | 242.28 | 455.24 | 290.99 | 398.04 | 444.65 | 255.17 | 255.17 |
| 3 | 382.39 | 433.53 | 424.89 | 272.25 | 553.72 | 328.18 | 599.69 | 525.58 | 382.39 | 382.39 |
| 4 | 410.12 | 449.95 | 416.59 | 291.66 | 539.64 | 336.37 | 665.77 | 548.20 | 410.12 | 410.12 |
| 5 | 354.93 | 393.65 | 442.41 | 259.70 | 555.35 | 315.11 | 526.69 | 512.71 | 354.93 | 354.93 |
| 6 | 28.60 | 30.67 | 37.19 | 23.73 | 58.62 | 31.05 | 37.72 | 50.97 | 28.60 | 28.60 |
| 7 | 16.47 | 15.91 | 18.30 | 13.84 | 27.56 | 15.18 | 24.77 | 24.33 | 16.47 | 16.47 |
| 8 | 13.28 | 19.35 | 15.01 | 12.27 | 24.77 | 14.99 | 20.80 | 24.21 | 13.28 | 13.28 |

Tabla 7: Valores de las cortantes en las bases del Viaducto La Flora para los diferentes sismos aplicados en dirección x.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base a los resultados arrojados por el programa SAP 2000 se observa lo siguiente:

6.1. DESPLAZAMIENTOS

6.1.1. Desplazamientos en la dirección x:

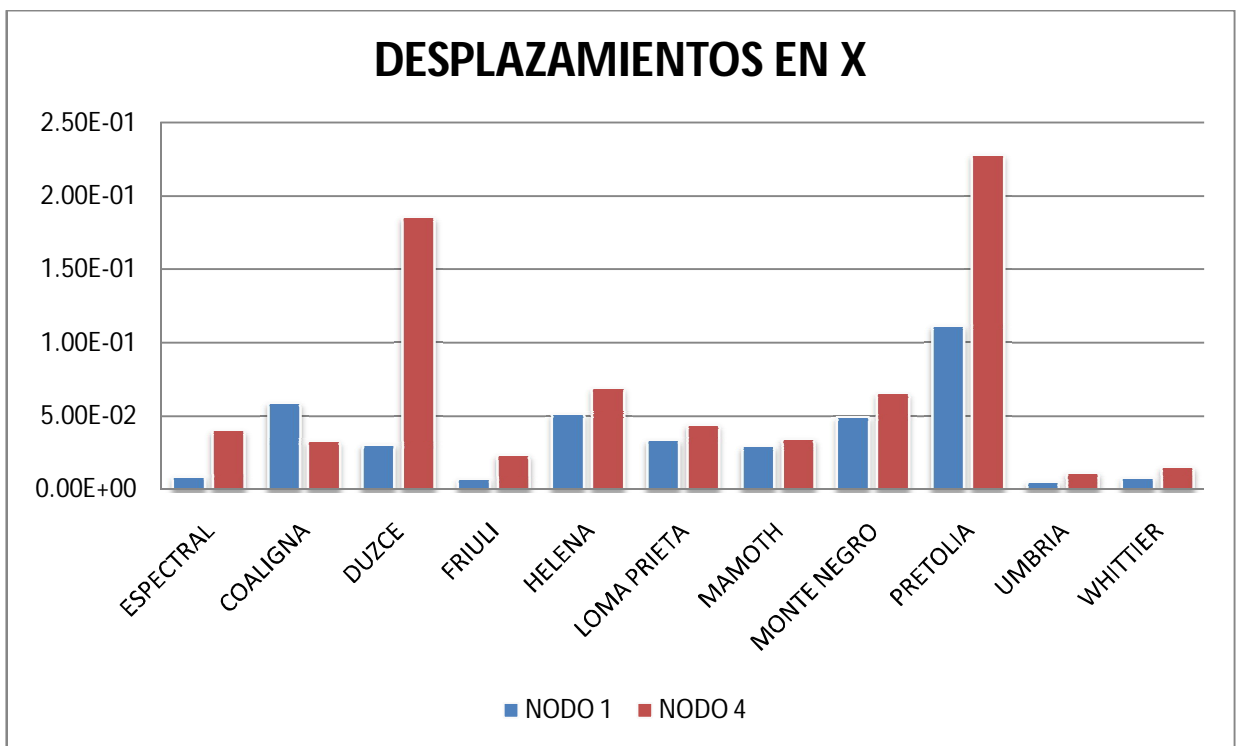


Ilustración 109: Gráfica resultados de desplazamientos de los casos estudiados en dirección x.

- Realizando una comparación a simple vista de los desplazamientos en los nodos de las pilas seleccionados como nodos de control, se observa de los análisis espectral y de historias en el tiempo que en la mayoría de los casos los desplazamientos en la dirección x de la estructura no se logra deformar más de cinco centímetros.
- Pretolia y Duzce son los sismos que tienen mayor incidencia en los nodos superiores de la pila central logrando deformarla alrededor de veinte centímetros.
- El comportamiento de la estructura ante los sismos propuestos por INGEOMINAS es bastante bueno en esta dirección de estudio, se ve reflejado en los bajos desplazamientos de la estructura.

6.1.2. Desplazamientos en dirección y:

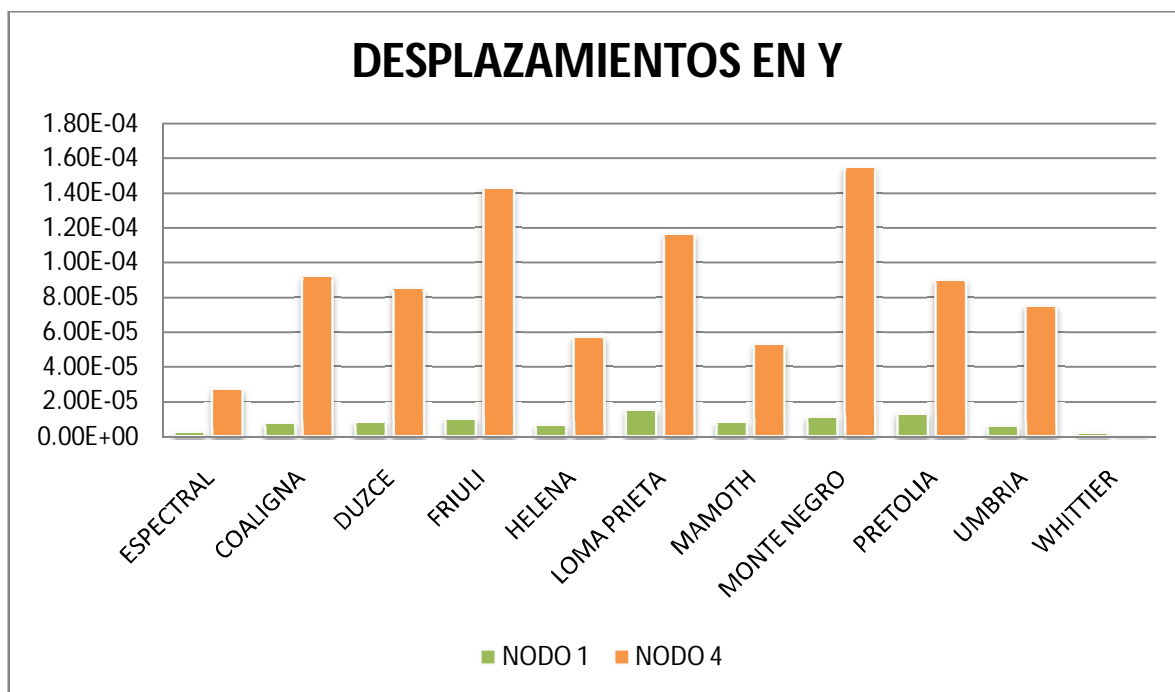


Ilustración 110: Gráfica resultados de desplazamientos de los casos estudiados en dirección y.

- Es claramente apreciable que la rigidez de la estructura en esta dirección es bastante alta debido a sus bajas deformaciones que están en el orden de decimas de milímetro, lo cual afecta muy poco a la estructura.
- A su vez se observa que la pila uno, por estar cerca a los estribos y a su altura, tiene una mayor rigidez que la pila central. Ya que esta última presenta deformaciones mayores.
- Haciendo la comparación con el comportamiento de los demás sismos la acción del sismo Whittier en dirección perpendicular al puente es cercana a cero.

6.2. CORTANTES EN LA BASE

6.2.1. Sismos aplicados en dirección x:

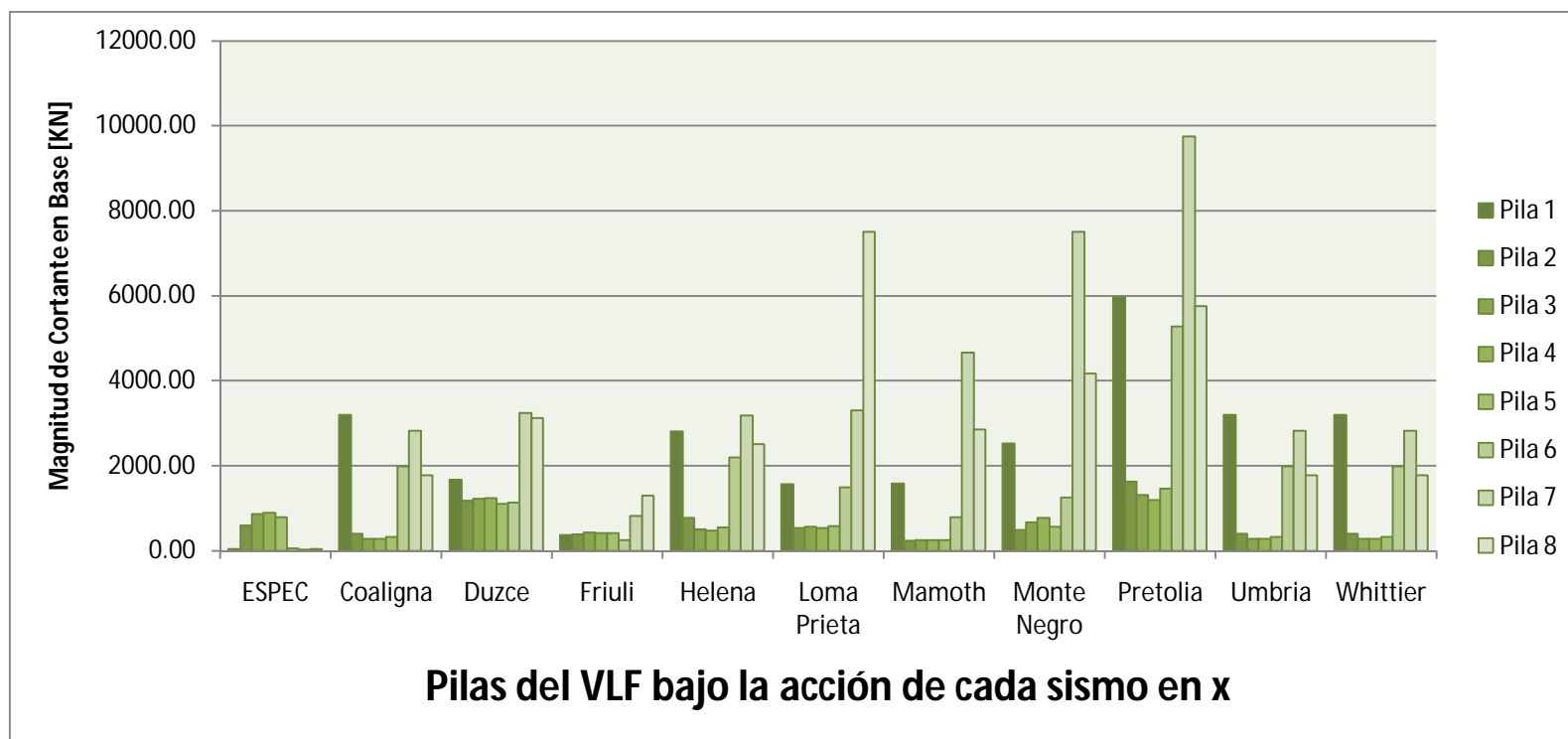


Ilustración 111: Cortantes en la base en cada una de las pilas bajo acción de cada uno de los análisis dinámicos en dirección x.

- Al analizar los cortantes en las bases producidos por la acción del espectro de diseño y los demás sismos analizados por medio del análisis de historias en el tiempo, se observa claramente que al ser aplicados en la dirección x, las pilas más cercanas a los estribos presentan una mayor magnitud de cortante.
- Al igual que en el análisis de desplazamientos en la dirección x, se observa que el sismo que más afecta a la estructura es el de Pretolia, alcanzando magnitudes casi del orden de diez mil kilo Newton.
- Del análisis de la gráfica también podemos observar que el cortante en la base producido por análisis modal-espectral es mucho menor en comparación con las reacciones de los análisis de historias en el tiempo.
- Además de lo anterior el análisis modal-espectral presenta un comportamiento diferente al presentado por los sismos del análisis de historias en el tiempo. Al parecer los valores más altos de cortantes se presentan en las pilas de mayor longitud, a diferencia de los otros.
- Es interesante observar además que el comportamiento de la estructura bajo la acción del sismo Friuli es diferente a los demás, la pila número uno, cercana al estribo de conucos tiene un valor de cortante en la base muy similar a la de las pilas centrales, lo cual no se observa en los comportamientos bajo los demás sismos.

6.2.2. Sismos aplicados en dirección y:

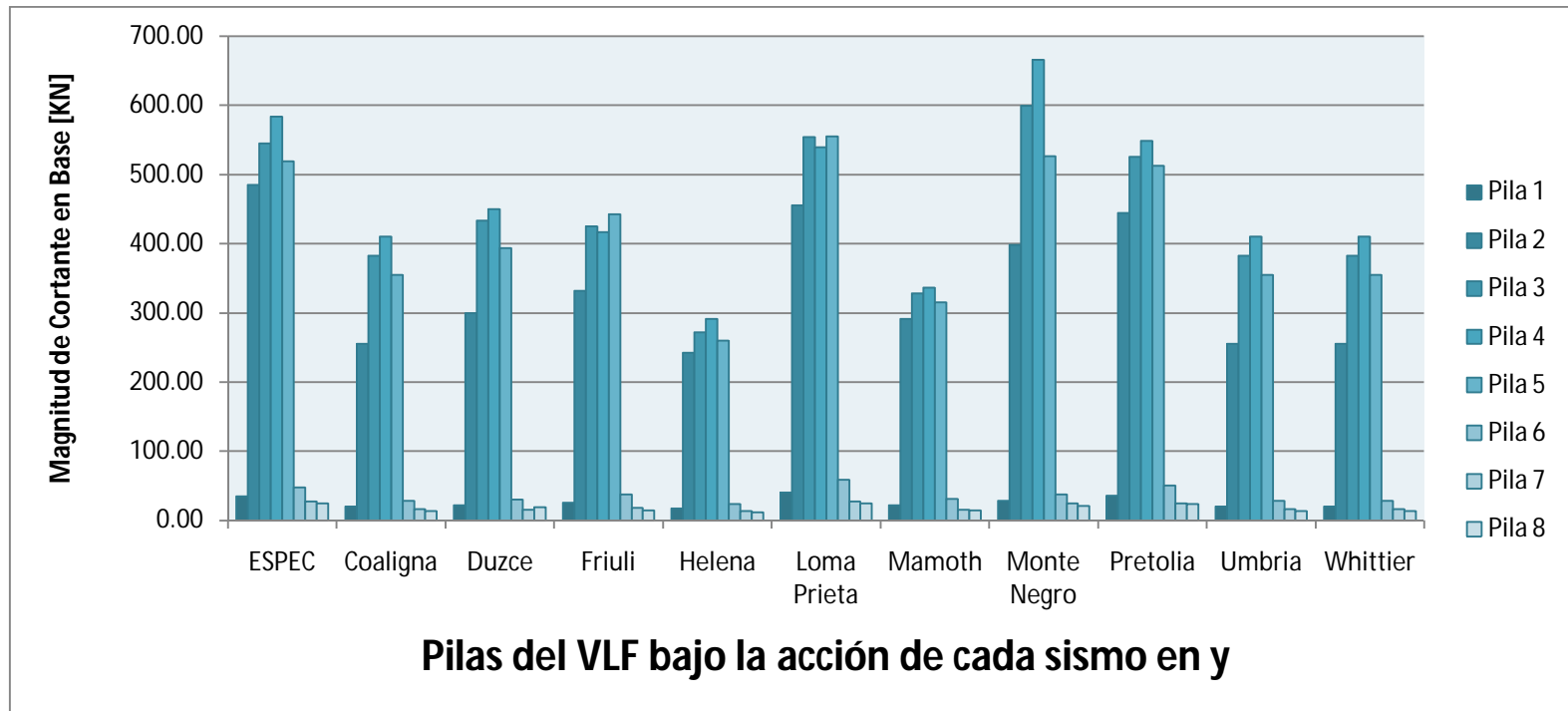


Ilustración 112: Cortantes en la base en cada una de las pilas bajo acción de cada uno de los análisis dinámicos en dirección y.

- El comportamiento observado en la gráfica cuando el sismo es aplicado en la dirección y, es muy diferente a la que presenta la estructura cuando el sismo actúa en la otra dirección.
- Se observa que las pilas de mayor altura, ubicadas más alejadas de los estribos del puente son las que presentan un cortante en la base de mayor magnitud, mientras que las que las primeras pilas junto con las ultimas que son las próximas a los estribos de la estructura, presentan menor cortante.
- A diferencia del comportamiento graficado cuando los sismos actuaban en dirección x, el análisis dinámico modal-espectral presenta un comportamiento bastante similar a los resultados arrojados por el análisis dinámico cuando los sismos son aplicados en dirección y.
- Los valores de cortante en las bases son mucho menores, que los obtenidos del análisis en dirección x y todos están cercanos los unos con los otros.
- El sismo Helena es aquel que produce menores reacciones en la estructura cuando es aplicado en dirección y, son menores de trescientos kilo Newton.

CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo una profunda investigación para encontrar los parámetros geométricos del Viaducto La Flora, con el fin de modelar y analizar sus propiedades por medio de la herramienta SAP 2000. Con lo cual se hizo posible el desarrollo de este proyecto.
- En la estructura analizada se vio el comportamiento bajo la acción de diferentes tipos de análisis necesarios para llevar a cabo una caracterización dinámica de la estructura.
- Se realizó un análisis dinámico modal-espectral, que permitió encontrar los diferentes modos de vibración de la estructura, la fracción o participación de masa y el periodo fundamental.
- Debido a que la participación de masa del segundo modo de vibración de la estructura es mayor a la del primero, se llegó a la conclusión que el periodo fundamental del viaducto La Flora es 2.8019 s, valor que pertenece al segundo modo.
- Utilizando el espectro de diseño propuesto por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes se llevó a cabo un análisis modal-espectral y se obtuvo los desplazamientos para ciertos nodos de control y reacciones en la base, para poder generar comparaciones con el análisis dinámico de historias en el tiempo.

- Al finalizar el análisis de historias en el tiempo se obtuvieron datos de deformaciones en los nodos de control (Nodo superior pilas 1 y 4) y reacciones en las bases después de haber sido sometida la estructura a los efectos de cada uno de los diez sismos propuestos por INGEOMINAS para la ciudad de Bucaramanga.

- Al llevarse a cabo la comparación de los resultados de los análisis dinámicos de la estructura se observó que:
 - Los resultados del análisis dinámico modal-espectral tienen menor incidencia en la estructura del Viaducto La Flora, ya que presentaron menores deformaciones y reacciones en la base, que las generadas por la familia de acelerogramas del INGEOMINAS.

 - El Sismo Pretolia, que pertenece a la falla Frontal de los Llanos Orientales, es aquel que más afecta a la estructura generando mayores desplazamientos en los nodos estudiados y reacciones de magnitudes más altas en las pilas cercanas a los estribos, cuando los sismos del análisis de historias en el tiempo son introducidos para analizar el comportamiento de la estructura en dirección x. Presenta desplazamientos de alrededor de veinte centímetros en la pila de mayor luz (más de cuarenta metros) y cortantes en la base de casi diez mil kilo Newton.

 - Debido a la alta rigidez de la estructura en dirección perpendicular al eje del puente, las deformaciones y reacciones en las bases son mucho menores a comparación con la otra dirección.

- A diferencia de la otra dirección de estudio, cuando los sismos son aplicados para analizar el comportamiento de la estructura en dirección y, el que más la afecta es el del sismo Monte Negro, el cual también pertenece a la falla Frontal de los Llanos Orientales. Éste genera desplazamientos del orden de 0.155 milímetros y reacciones en la base de setecientos kilo Newton. Lo que no afecta significativamente la estructura.
- El Viaducto La Flora o Armando PuyanaPuyanaes una estructura bastante resistente, que ante la acción de condiciones diferentes a las normales de operación, presentaría un desempeño bastante bueno con deformaciones y reacciones razonables.

BIBLIOGRAFÍA

TESIS

[1] **ESPINOZA, F.** Determinación de características dinámicas de estructuras (1999). Universidad Politécnica de Cataluña. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España.

[2] **GONZÁLES, L., ZAPICO, E.** SIMULACIÓN DINÁMICA DE ESTRUCTURAS MEDIANTE MODELADO POR ELEMENTOS FINITOS Y REDUCCIÓN DE ORDEN EMPLEANDO EL ESPACIO DE ESTADO (2009). EN: Mecánica Computacional Vol. XXVIII, pp. 2905-2926.

LIBROS, REVISTAS, FOLLETOS, ARTÍCULOS Y NOTAS.

[3] **CHÍO, G., MALDONADO, E.,** ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES (2004). Universidad Industrial de Santander. Colombia.

[4] **CHOPRA, A. K., (1995)** Dynamics of Structures, theory and applications to earthquake engineering, University of California at Berkeley, Editorial Prentice Hall, New Jersey, United States of America.

[5] **COMPUTERS AND STRUCTURES, (2010)** CSI Analysis Reference Manual, Berkeley, United States of America. pp 321 – 360.

[6] **INGEOMINAS (2001).** Zonificación Sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.

NORMAS

[7] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE (NSR-10). Bogotá, Colombia.

[8]Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (1995) .Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, Santa Fe de Bogotá, Colombia

[9] Building Seismic Safety Council. (2004). NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450). Washington, United States of America.

APUNTES

[10] CASSANO, A. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS BAJO ACCIONES DINÁMICAS (2009). Universidad Tecnológica Nacional, Departamento Ingeniería Civil, Facultad Regional Paraná.