



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTA DE INGENIERÍA CIVIL

“EVALUACIÓN DE USO DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO COMO FUNCIÓN DE
LA DISTANCIA EPICENTRAL DE PUENTES”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JORGE MELGAREJO VALDÉS

DIRECTOR DE TESIS:

PhD. EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS. JOSÉ MANUEL JARA GUERRERO

MORELIA MICHOACÁN DICIEMBRE DEL 2018



DEDICATORIA

A Azul.



AGRADECIMIENTOS

Considero el conocimiento como la herramienta más importante del hombre, ende, compartir conocimiento uno de los actos más nobles. Agradezco a todo aquel que ha dedicado un momento de su vida a brindarme alguna enseñanza.



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
ANTECEDENTES.....	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
OBJETIVOS	20
1.- CREACIÓN DE MODELOS EN SAP2000 V19.2.1.	21
1.1.- COMPONENTES ESTRUCTURALES Y MATERIALES A CONSIDERAR	21
1.2.- DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA.....	22
1.3.- DEFINICIÓN DEL CONCRETO DE 300KG/CM ²	22
1.4.- DEFINICIÓN DE LAS SECCIONES QUE TENDRÁN LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.	23
1.4.1.- SUBESTRUCTURA.	23
1.4.1.1.- SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS COLUMNAS.	24
1.4.1.2.-SECCIÓN TRASVERSAL DE LOS CABEZALES.....	25
1.4.2.- SUPERESTRUCTURA.....	25
1.4.2.1.- SECCIÓN TRANSVERSAL DE LAS VIGAS TIPO AASHTO TIPO IV.	26
1.4.2.2.- SECCIÓN TRASVERSAL DE DIAFRAGMAS.	27
1.4.2.3.- SECCIÓN DE LA LOSA DE CONCRETO	28
1.4.3.- DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS TIPO LINK EN SAP2000.....	28
1.4.3.1.- APOYOS DE NEOPRENO FIJOS, MODELO 1.	28
1.4.3.2.- APOYOS DE NEOPRENO MÓVILES, MODELO 1.	29
1.4.3.3.- JUNTAS DE DILATACIÓN, MODELO 1.	30
1.4.3.4.- AISLADORES SÍSMICOS CON NÚCLEO DE PLOMO, MODELO 2.	31
2.- FUERZAS ACTUANTES Y COMBINACIONES DE FUERZAS.	32
2.1.- FUERZAS ACTUANTES.	32



2.1.1.-CARGAS PERMANENTES CONSIDERADAS.....	32
2.1.2.- CARGAS MÓVILES CONSIDERADAS.	33
2.1.3.- CARGAS ACCIDENTALES.....	33
2.1.3.1.- CARGA ACCIDENTAL POR EFECTO SÍSMICO.	34
2.2.- TIPOS DE ANÁLISIS Y COMBINACIONES DE CARGA.....	38
2.2.1.- ANÁLISIS ESTÁTICO LINEAL.....	38
2.2.2.- ANÁLISIS MODAL.....	38
2.2.3.- ANÁLISIS DE CARGAS MÓVILES.....	39
2.2.4.- ANÁLISIS SÍSMICO ESPECTRAL.....	40
2.2.5.- ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL.....	45
2.3.- COMBINACIONES DE FUERZAS.....	46
2.3.1.- CARGA MUERTA.....	46
2.3.2.- RESISTENCIA I.....	46
2.3.3.- EVENTO EXTREMO I.....	49
3.-DISEÑO DE COLUMNAS, APOYOS DE NEOPRENO Y AISLADORES SÍSMICOS.....	51
3.1.- FUERZAS EN ELEMENTOS.....	51
3.1.1.- FUERZA AXIAL (DIRECCIÓN U3 O Z) SOBRE LAS COLUMNAS.....	51
3.1.2.- FUERZA AXIAL (DIRECCIÓN U3 O Z) SOBRE LOS AISLADORES SÍSMICOS (MODELO 2).....	52
3.1.3.- PERIODO DE VIBRACIÓN (MODELO 1).....	53
3.2.- DISEÑO DE ELEMENTOS.....	54
3.2.1.- DISEÑO DE COLUMNAS.....	54
3.2.2.- DISEÑO DE APOYOS DE NEOPRENO FIJOS Y MÓVILES.....	57
3.2.3.- DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS.....	60
3.2.3.1.- VERIFICACIONES DEL DISEÑO DEL AISLADOR (LRB).....	77
4.- PERIODOS DE RETORNO.....	83
5.- ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL.....	98
5.1.- LONGITUD DE LA RÓTULA PLÁSTICA.....	99
5.2.- DEFINICIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS ARTICULACIONES PLÁSTICAS.....	101
5.3.- ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ AGRIETADA PARA LOS ELEMENTOS TIPO COLUMNA.....	109
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	111
CONCLUSIONES.....	154
REFERENCIAS.....	156



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Registros sísmicos de distancia cercana al epicentro.	36
Tabla 2.- Registros sísmicos de distancia lejana a la costa.	37
Tabla 3.- Registros sísmicos de distancia media a la costa.	37
Tabla 4.- Desface de líneas de acción de carga vehicular.	40
Tabla 5.- Factor de carga.....	47
Tabla 6.-Factores de carga por combinación.	47
Tabla 7.- Combinación Resistencia I.	49
Tabla 8.- Combinación evento extremo I.....	49
Tabla 9.- Carga axial por peso muerto soportada por las columnas según su zona.	52
Tabla 10.- Especificaciones de acero longitudinal y transversal.	56
Tabla 11.- Verificación de cumplimiento de especificaciones.	56
Tabla 12.-Rigideces de los apoyos.	60
Tabla 13.-Diámetros del aislador.	67
Tabla 14.-Propiedades técnicas de los aisladores (obtenida de: http://www.dis-inc.com/index.html) ...	68
Tabla 15.- Propiedades de diseño de los aisladores (Obtenida de: http://www.dis-inc.com/index.html)	68
Tabla 16.- Propiedades del aislador (LRB).	82
Tabla 17.-Periodos de retorno.	83
Tabla 18.- Espectro escalados según su periodo de retorno.	85
Tabla 19.- Factores de escala de espectros.	95
Tabla 20.- CCC Momento - Curvatura.	103
Tabla 21.-Momento - curvatura (CCL).	104
Tabla 22.- CCE momento curvatura.	105
Tabla 23.- CE momento - curvatura.	107
Tabla 24.- Factor de reducción por agrietamiento.	110
Tabla 25.- Puntos de desempeño dirección transversal, modelo 1.....	113
Tabla 26.- Puntos de desempeño dirección longitudinal, modelo 1.	118
Tabla 27.- Puntos de desempeño dirección transversal, modelo 2.....	123
Tabla 28.- Puntos de desempeño dirección longitudinal, modelo 2.	128
Tabla 29.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 1 dirección trasversal.....	133
Tabla 30.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 1 dirección longitudinal.	134
Tabla 31.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 2 dirección trasversal.....	135
Tabla 32.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 2 dirección longitudinal.	136
Tabla 33.- Puntos de desempeño de las columnas.....	137
Tabla 34.- Promedios de puntos de desempeño, columnas.....	142
Tabla 35.- TABLA 6-7 FMA 273, 1997.....	143
Tabla 36.- Desplazamientos en dirección transversal de ambos modelos.....	145
Tabla 37.- Desplazamientos en dirección longitudinal de ambos modelos.....	146
Tabla 38.- Comparación de cortantes basales en ambos modelos.	148



Tabla 39.- Porcentajes de reducción de cortante basal.....	149
Tabla 40.- Comparación de desplazamientos en ambos modelos	151
Tabla 41.- Porcentajes de reducción en desplazamientos.....	152



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Clam bridge.....	15
Figura 2.- Puente tipo armadura.....	15
Figura 3.-Puente Golden Gate	15
Figura 4- Pagoda japonesa.....	16
Figura 5.- Pagoda japonesa.....	16
Figura 6.- Aislador elastomérico (https://cauchosvikingo.com/aisladores-sismicos/).....	17
Figura 7.- Aisladores elástomérico con núcleo de plomo (http://www.mageba-group.com/es/978/Viaduc-de-Chillon.htm?Reference=43836).....	18
Figura 8.- Aislador de pendulo d fricción (http://www.sismica.cl/?portfolio=aisladores-de-pendolo-friccional-dobles).	18
Figura 9.- Aisladores de resortes metálicos (http://www.mageba-group.com/es/978/Viaduc-de-Chillon.htm?Reference=43836).	19
Figura 10.- Elementos estructurales del puente.....	21
Figura 11.- Dimensiones de la estructura	22
Figura 12.- Definición de concreto.....	22
Figura 13.-Subestructura.	23
Figura 14.- Marcos de subestructura.....	23
Figura 15.- Sección transversal de columnas.....	24
Figura 16.- Cabezal.....	25
Figura 17.- Superestructura	26
Figura 18.- Viga AASTHO tipo iv.....	27
Figura 19.- Diafragma de rigidez.....	27
Figura 20.- Losa de concreto.....	28
Figura 21.- Rigidez de apoyos de neopreno fijos.....	29
Figura 22.- Definición de apoyos de neopreno fijos.....	29
Figura 23.- Rigidez apoyos de neopreno móviles.....	29
Figura 24.- Apertura y rigidez de las juntas de dilatación.....	30
Figura 25.-Definición de juntas de dilatación.....	30
Figura 26.- Definición de LRB.....	31
Figura 27.- Propiedades laterales del LRB.....	31
Figura 28.- Propiedades verticales del LRB.....	31
Figura 29.- Sección transversal del parapeto.....	32
Figura 30.- Epicentro de sismos considerados.....	35
Figura 31.- Mapa de actividad sísmica en México (Obtenido del software Prodisis de la CFE).....	35
Figura 32.- Carga vehicular T3-S2-R4.....	39
Figura 33.- Carga vehicular HS-20.....	39
Figura 34.- Carga vehicular T3-S3	39



Figura 35.- Creación de espectro elástico (Imagen obtenida de Guía de Estudio ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO, Universidad Nacional de Cuyo Facultad de

Ingeniería, Francisco Crisafulli, Elbio Villafañe)	41
Figura 36.- Grafica de intensidad de Arias. Obtenida de acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985)	Mb= 6.5
Figura 37.- Gráficas sin corrección de línea base. Obtenida de acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985)	Mb= 6.5
Figura 38.- Gráficas con corrección de línea base. Obtenida de acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985)	Mb= 6.5
Figura 39.- Espectro elástico. Obtenido del acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985)	43
Mb= 6.5	
44	
Figura 40.- Definición del análisis no lineal vertical	45
Figura 41.- Definición de análisis estático no lineal horizontal.....	45
Figura 42.- HS-20 (obtenido de http://www.construaprende.com/docs/tesis/295-conservacion-puentes-carreteros?start=6).....	48
Figura 43.- T3-S2-R4 (http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_04/ar_01.pdf)	48
Figura 44.- Esquema de columnas que soportan la misma carga muerta.....	51
Figura 45.- Periodo de ondulación. (http://uno2y3.com/pau-comunidad-valenciana-fisica-2016-a-bii/).	53
Figura 46.- modos de vibrar y periodos de vibración (http://www.redalyc.org/html/1939/193932724001/).	53
Figura 47.- Combinaciones para diseño de las columnas de concreto.....	55
Figura 48.-Sección transversal de la columna.....	57
Figura 49.- Apoyo de neopreno fijo.	58
Figura 50.- Apoyo de neopreno móvil.	59
Figura 51.-Aislador (LRB) con ambas placas de agarre.	61
Figura 52.- Aislador (LRB) sin placa superior de agarre.	61
Figura 53.- Esquema de apoyos de neopreno y separación en trabes.	62
Figura 54.- Esquema de aisladores sísmicos, sin separación en trabes.	62
Figura 55.- Esquema del sistema de aisladores sísmicos.....	65
Figura 56.- Desplazamiento del aislador (LRB).	68
Figura 57.- Esquema de lámina de caucho	71
Figura 58.- Lazo histerético.....	74



Figura 59.-Área superpuesta del aislador (LRB) en el desplazamiento máximo.	79
Figura 60.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro.	86
Figura 61.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro con TR = 500.	87
Figura 62.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro para TR =100.	87
Figura 63.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro con TR=2,500.	88
Figura 64.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro con TR = 1,000.	88
Figura 65.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro.	89
Figura 66.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=500.	90
Figura 67.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=100.	90
Figura 68.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=2,500.	91
Figura 69.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=1,000.	91
Figura 70.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro.	92
Figura 71.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro. con TR=500.	93
Figura 72.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro con TR= 100.	93
Figura 73.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro. con TR=2,500.	94
Figura 74.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro. con TR=1,000.	94
Figura 75.- Gráfica momento - curvatura de la sección transversal de la sección tipo columna descrita en este trabajo, con una carga axial nula.	101
Figura 76.- Gráfica momento - curvatura, formada por cinco puntos en sap2000	102
Figura 77.- Comportamiento de la articulación en dirección transversal, columnas tipo (CCC).	103
Figura 78.- CCC Gráfica momento - curvatura	103
Figura 79.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CCC).....	104
Figura 80.- CCL Gráfica momento - curvatura.	104
Figura 81.- Comportamiento de la articulación en dirección transversal, columnas tipo (CCL).....	105
Figura 82.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CCL).	105
Figura 83.- CCE Gráfica momento - curvatura	106
Figura 84.- Comportamiento de la articulación en dirección transversal, columnas tipo (CCE).	106
Figura 85.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CCE).....	107
Figura 86.- Gráfica momento - curvatura	107
Figura 87.- Comportamiento de la articulación en dirección transversal, columnas tipo (CE).	108
Figura 88.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CE).	108
Figura 89.- Pantalla de analisis ATC - 04 en sap2000.....	112
Figura 90.- Ubicación gráfica del punto de control.....	144
Figura 91.-Porcentajes de reducción de fuerza cortante en dirección transversal	150
Figura 92.-Porcentajes de reducción de fuerza cortante en dirección longitudinal.....	150
Figura 93.- Porcentajes de reducción en desplazamientos en dirección transversal.....	153
Figura 94.-Porcentajes de reducción en desplazamientos en dirección longitudinal	153



RESUMEN

En la presente tesis se analiza el efecto sísmico en un modelo de puente vehicular típico, formado por vigas tipo AASHTO IV y columnas circulares, el cual es sometido a aceleraciones sísmicas de temblores con epicentros en distancia cercana, media y lejana. Se considera un modelo de puente con apoyos de neopreno y un modelo con aisladores sísmicos con núcleo de plomo, también denominados LRB por sus siglas Lead Rubber Bearings. Los modelos se calculan con el software de análisis estructural SAP2000 V19.2.1. En el cual se realiza un análisis estático no lineal (push over), y se analizan los resultados obtenidos, según la curva de espectros de capacidad.



ABSTRACT

In the present thesis it is analyzed the seismic effect on a typical vehicular bridge model, made of AASHTO IV type beams and circular columns, which is subject to earthquakes seismic accelerations with close, medium and long epicenter distances. It is considered a bridge model with neoprene support and a model with lead core seismic insulators, also known as LRB by its acronyms Lead Rubber Bearings. These models are measured by the structural analysis software SAP2000 V19.2.1. In which a nonlinear static analysis is performed (push over), and the data obtained is analyzed, according to the curve of capacity spectra.



INTRODUCCIÓN

En la presente tesis se realiza el análisis del efecto que tiene la distancia epicentral entre el origen del evento sísmico y el sitio de localización de un puente vehicular típico. Se cuantifica este efecto con la demanda de desplazamiento y elementos mecánicos causados por las aceleraciones en la base. También se considera en el presente trabajo el efecto que tiene este parámetro en la respuesta de estructuras con aisladores sísmicos del tipo Lead Rubber Bearings (LRB). Se compara un modelo de puente sin estos dispositivos y uno en el que se agreguen aisladores LRB, conservando la misma subestructura y superestructura en ambos, con el objetivo de analizar la respuesta sísmica de los modelos sometidos a las mismas demandas sísmicas.



Antecedentes

Los puentes son estructuras que conectan dos puntos de una manera eficaz, ya sea salvando un caudal, un barranco o vías vehiculares, entre otros. Pueden ser construidos de diferentes materiales, entre los más comunes se encuentran: madera, rocas, ladrillos, acero y concreto.

Han sido estructuras muy usadas a lo largo de la historia, debido a su gran importancia para facilitar la comunicación. Alrededor del mundo existen muchos tipos de puentes, algunos también cuentan con una gran diversidad de época de construcción, ya sean puentes naturales (creados por la erosión con el paso de los años) o artificiales (creados por la intervención del hombre).

Es muy probable que incluso se construyeran los primeros puentes desde la aparición del Homo Habilis aparecidos hace 2,500,000 años, conocido por ser nuestro primer ancestro evolutivo capaz de crear herramientas con el uso de la lógica de su funcionamiento. Sin embargo, el puente considerado más antiguo del mundo es el llamado Clam Bridge (FIGURA 1), ubicado en Inglaterra, con aproximadamente 10, 000 años de antigüedad, compuesto de un megalito que cruza un paso de agua. Ésta es quizá la manera más sencilla de realizar un puente, colocar una pieza única que comunique ambos extremos, sin embargo, sólo es posible cuando el claro es relativamente pequeño y la pieza es lo suficientemente grande y resistente para soportar las fuerzas a las que es sometida.





Figura 1.- Clam bridge.

Los primeros puentes realizados, seguramente fueron muy rústicos, creados de troncos o de rocas, los cuales, con el paso del tiempo y el avance del pensamiento humano, pudieron ser estudiados y comprendidos de una manera más precisa. Un ejemplo de este avance son los acueductos y puentes construidos durante el imperio romano en distintos puntos de Europa, los cuales nacieron al notar los efectos de la flexión en la roca, incapaz de soportar grandes esfuerzos de tensión, pero capaces de soportar altos esfuerzos de compresión. La solución fue crear estructuras en forma de arco, tales como los acueductos y puentes que aún se conservan de esa época, y se siguen construyendo en la actualidad debido a su gran efectividad en distribuir esfuerzos, de manera que todas sus partes resultan sometidas a compresión, lo que es adecuado si consideramos materiales como la roca o el concreto.

Hoy en día se pueden apreciar estructuras antiguas con estas características, tales como el acueducto de Segovia, el cual fue construido únicamente de roca, sin ningún tipo de argamasa y aún se mantiene en pie. Posteriormente con el avance tecnológico en materiales de construcción, así como en los métodos y cálculos constructivos, además de la creciente necesidad de unir distancias mayores con puentes sometidos a mayores solicitaciones de esfuerzos, se comenzaron a estudiar y realizar distintos tipos de puentes, tales como: puentes de armadura, puentes colgantes, puentes atirantados, puentes voladizos, entre otros. De estudios de este tipo fue como nació el primer libro de construcción de puentes escrito por Hubert Gautier en el año de 1716.



Figura 3.-Puente Golden Gate



Figura 2.- Puente tipo armadura



En este caso se analizará un puente tipo viga, el cual usa el principio básico de apoyar piezas creadas monóticamente, para salvar una distancia y unir de manera eficaz los extremos.

El estudio de los efectos sísmicos en los puentes nace de la creciente necesidad de reducir las enormes pérdidas económicas y humanas que se suelen presentar en estructuras de grandes dimensiones cuando son sometidas a la acción devastadora de los sismos.

El estudio del movimiento sísmico de las estructuras, es un tema muy antiguo como lo muestran los registros con más de 3,000 años de antigüedad en la historia china, además de Japón, donde se construyeron edificios llamados



Figura 4- Pagoda japonesa



Figura 5.- Pagoda japonesa

“Pagodas” (FIGURAS 4 Y 5), en los que ya se consideraba el efecto sísmico, dejando juntas sin clavos que permiten su movimiento y colocando troncos como péndulos, que restringen el movimiento horizontal excesivo.

Sin embargo, el diseño sísmico moderno es algo relativamente nuevo, ya que apenas se comenzó a considerar en el siglo XX, siendo la primera publicación con recomendaciones de construcción

sísmica en 1908 por la nombrada comisión investigadora del sismo, en E.U.A. Posteriormente se publicaría en 1910 la teoría del rebote elástico por Hugo Fielding Reid, la cual ha demostrado ser de gran importancia en los estudios de los efectos sísmicos. De igual manera en México se comenzó a considerar el efecto sísmico en el año de 1910, pero no fue



hasta 1960 que se comenzó a estudiar de una manera más completa con la instalación de los primeros acelerógrafos instalados en la República Mexicana.

Debido a la necesidad de disminuir los devastadores efectos sísmicos en las estructuras y gracias al avance en la investigación, se desarrollan dispositivos de disipación y aislamiento sísmico.

Los dispositivos de aislamiento sísmico son elementos que se agregan generalmente en la base de las estructuras para reducir la rigidez del sistema, y aumentar también el amortiguamiento.

Al reducir la rigidez de la estructura, aumentan sus periodos de vibrar y, en sitios con amplificaciones importantes en periodos cortos, reducen de forma importante las demandas sísmicas.

Incrementar el amortiguamiento ayuda a reducir las fuerzas que llegan a la estructura, disminuyendo con esto la demanda de fuerzas y de desplazamientos.

Los dispositivos de aislamiento sísmico han demostrado ser muy eficaces en análisis numéricos, estudios teóricos y ensayos de laboratorio, por eso la importancia de su adición en estructuras construidas en zonas de peligro sísmico importante.

Hoy en día en el mercado se puede encontrar una variada gama de dispositivos de disipación: se mencionarán algunos de los más destacados:

- Aisladores elastoméricos.

Están conformados por capas intercaladas de caucho natural y láminas de acero. Los cuales brindan flexibilidad horizontal con alta rigidez vertical.

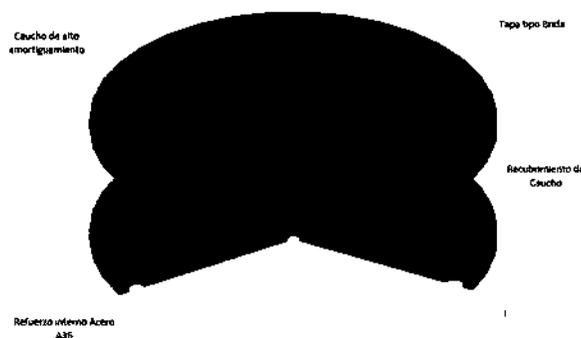


Figura 6.- Aislador elastomérico
(<https://cauchosvikingo.com/aisladores-sismicos/>).



- Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

Son aisladores formados de la misma manera que los anteriores, con la diferencia de que éstos cuentan con un corazón circular de plomo el cual brinda disipación de energía por su comportamiento histerético.

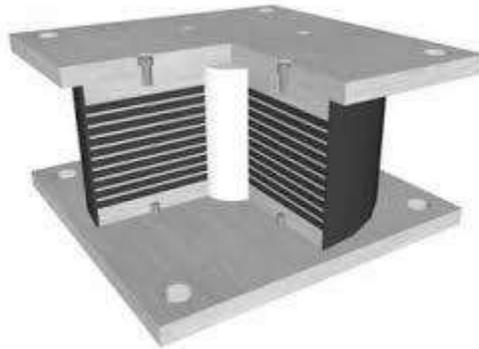


Figura 7.- Aisladores elástico con núcleo de plomo
(<http://www.mageba-group.com/es/978/Viaduc-de-Chillon.htm?Reference=43836>).

- Aisladores de péndulo de fricción.

Estos aisladores tienen la forma de péndulo en la base, cuyo radio controla el periodo de vibración natural de la estructura, además de disipar energía mediante la fricción.



Figura 8.- Aislador de péndulo de fricción
(<http://www.sismica.cl/?portfolio=aisladores-de-pendulo-friccional-dobles>).

- Aisladores de resortes metálicos.



Están formados por paquetes de resortes helicoidales conectados en paralelo con amortiguadores viscosos, su comportamiento es similar al del aislador elastomérico.



Figura 9.- Aisladores de resortes metálicos (<http://www.mageba-group.com/es/978/Viaduc-de-Chillon.htm?Reference=43836>).

En este trabajo se realiza el modelo del puente considerando los aisladores sísmicos con núcleo de plomo LRB, debido a su amplia aplicación en la práctica y a que han demostrado tener un comportamiento muy eficaz.



Planteamiento del problema

A lo largo de la historia los sismos han demostrado ser devastadores en las estructuras, causando graves daños en las mismas, en muchas ocasiones irreparables, y en el peor de los casos causan el derrumbe, lo que puede también conducir a pérdidas de vidas humanas. Los puentes son estructuras muy comunes y de gran importancia para la comunicación. Su diseño debe evitar colapsos ante aceleraciones sísmicas altas, siendo aceptables los daños en la estructura tales como agrietamiento y creación de rótulas plásticas, siempre y cuando no comprometa la estabilidad de los puentes.

Objetivos

- Mostrar la realización de un modelo matemático de un puente con dispositivos de aislamiento sísmico.
- Mostrar el efecto sísmico en puentes al alejarse del epicentro de los temblores.
- Analizar el comportamiento de la estructura con la adición de dispositivos de aislamiento sísmico.



1.- Creación de modelos en Sap2000 v19.2.1.

1.1.- Componentes estructurales y materiales a considerar.

En este trabajo se realiza el modelo de un puente vehicular, el cual es diseñado con características muy comúnmente encontradas en estas estructuras. El puente está compuesto de una subestructura formada por columnas circulares sobre las cuales se apoya un cabezal rectangular; sobre los cabezales se colocan los apoyos, ya sean apoyos de neopreno (que se denota en este trabajo “modelo 1”) o aisladores sísmicos (modelo 2), en los que descansa la superestructura del puente. La losa de concreto de 20 cm de espesor se apoya sobre vigas tipo AASHTO tipo IV. Las traveses se encuentran unidas transversalmente mediante diafragmas rectangulares de concreto colocados a cada 10 metros. El concreto es de una

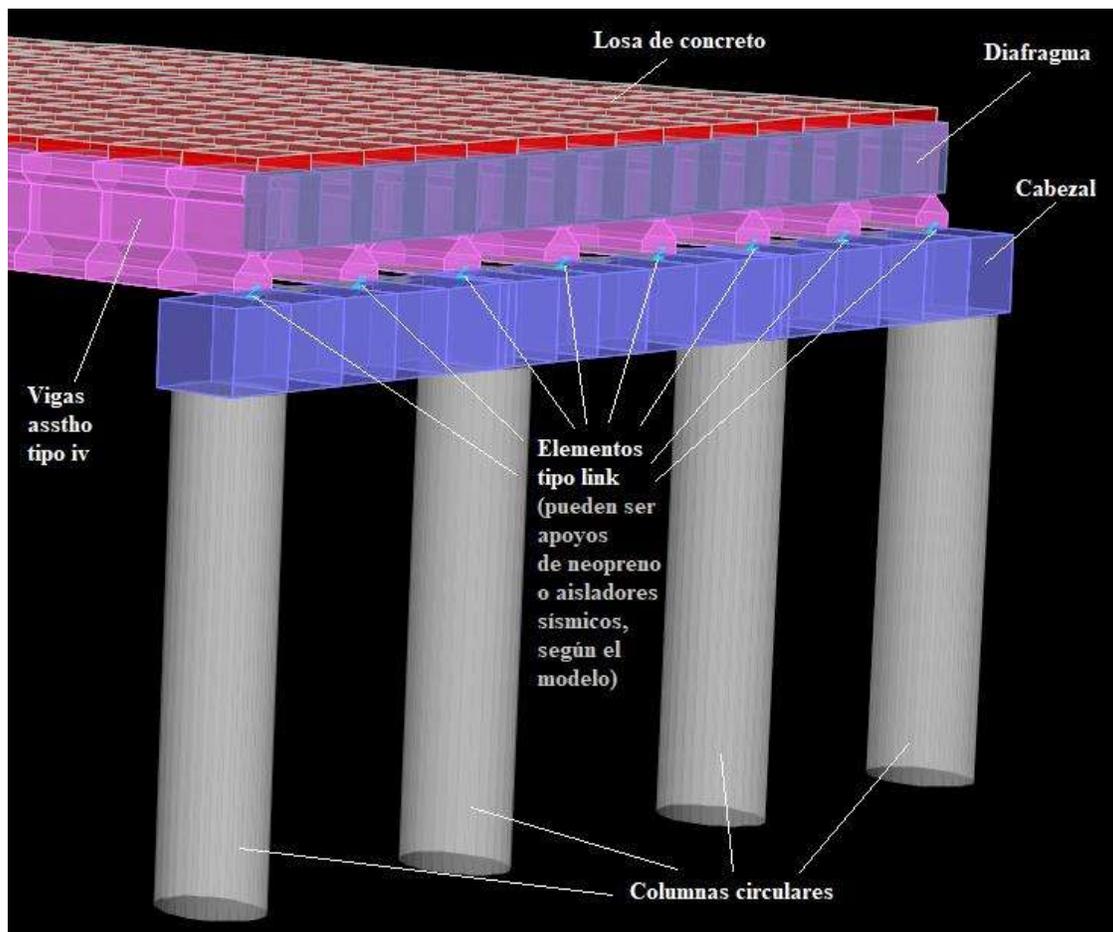


Figura 10.- Elementos estructurales del puente

resistencia de 300kg/cm^2 . Las medidas y detalles se definen a continuación.



1.2.- Dimensiones de la estructura.

La estructura tiene cuatro claros de treinta metros cada uno de ellos, para los cuales son comúnmente usadas las vigas AASHTO tipo IV. (FIGURA 7).

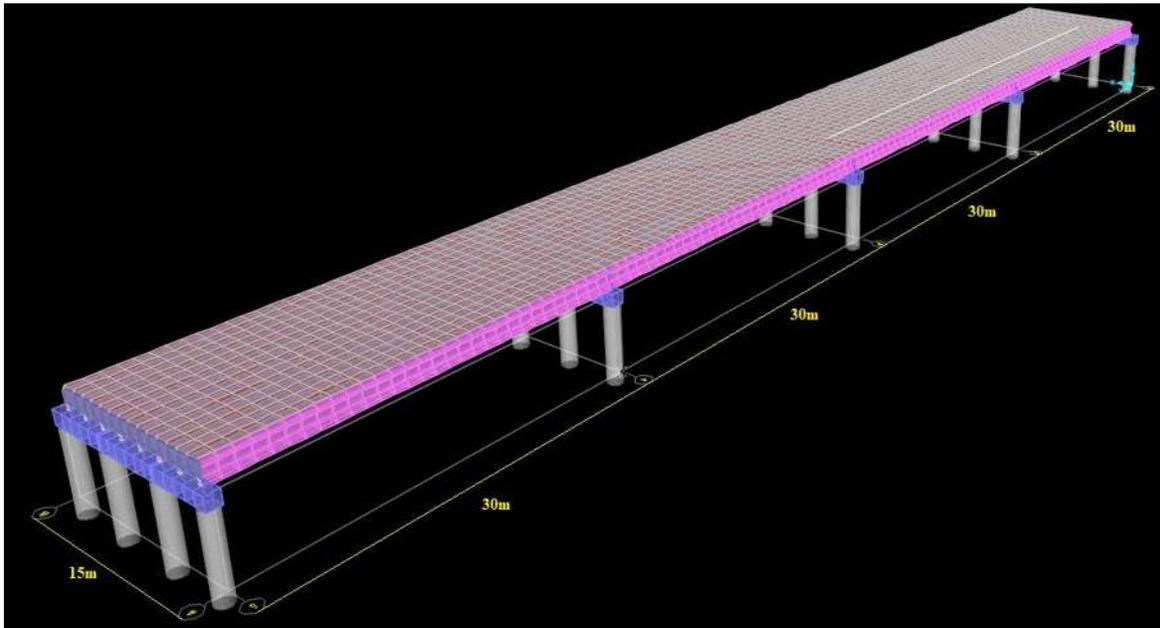


Figura 11.- Dimensiones de la estructura

1.3.- Definición del concreto de 300kg/cm².

Se definen las propiedades físicas del material en el programa Sap2000. FIGURA 8.

Property	Value
Material Name and Display Color	300kg/cm2
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight per Unit Volume	2402.7697
Mass per Unit Volume	245.0143
Units	Kgf, m, C
Modulus of Elasticity, E	2.425E+09
Poisson, U	0.2
Coefficient of Thermal Expansion, A	9.900E-06
Shear Modulus, G	1.010E+09
Specified Concrete Compressive Strength, Fc	3000000
Expected Concrete Compressive Strength	3000000
Lightweight Concrete	<input type="checkbox"/>
Shear Strength Reduction Factor	
Switch To Advanced Property Display	<input type="checkbox"/>

Figura 12.- Definición de concreto



1.4.- Definición de las secciones que tendrán los elementos estructurales.

1.4.1.- Subestructura.

La subestructura (FIGURA 9) está compuesta de cinco marcos con una separación de 30 metros entre sus centroides, cada uno de estos marcos están formados por 4 columnas con sección circular de 1.2 metros de diámetro y un cabezal apoyado sobre ellas con una sección rectangular de 1.2 metros de base por 1 metro de peralte total.

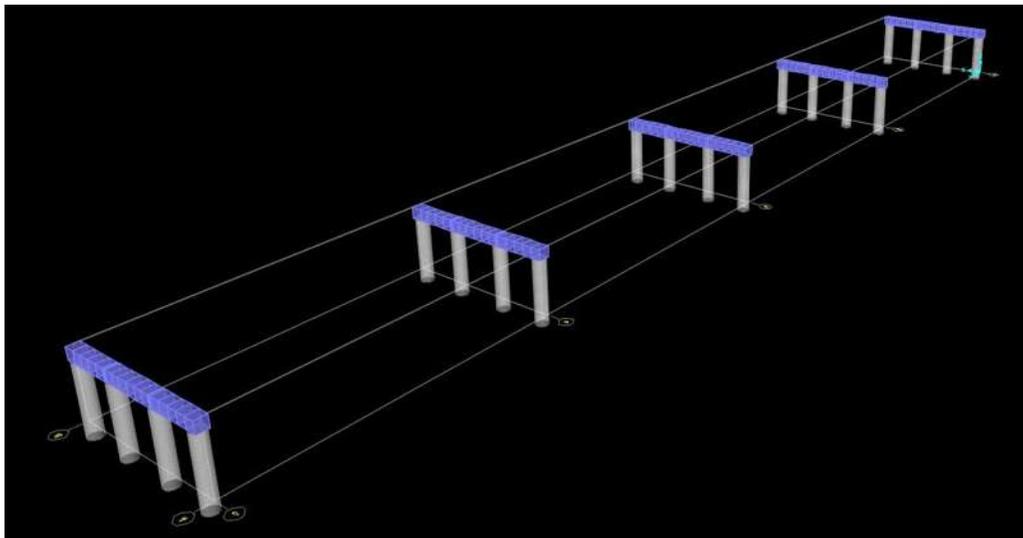


Figura 13.-Subestructura.

Todos los marcos son de las mismas características. Las columnas exteriores están separadas de las interiores de centro a centro por 4.4m. mientras que las dos interiores están separadas entre ellas por 5m. La altura de todas las columnas es de 6 m (FIGURA 10).

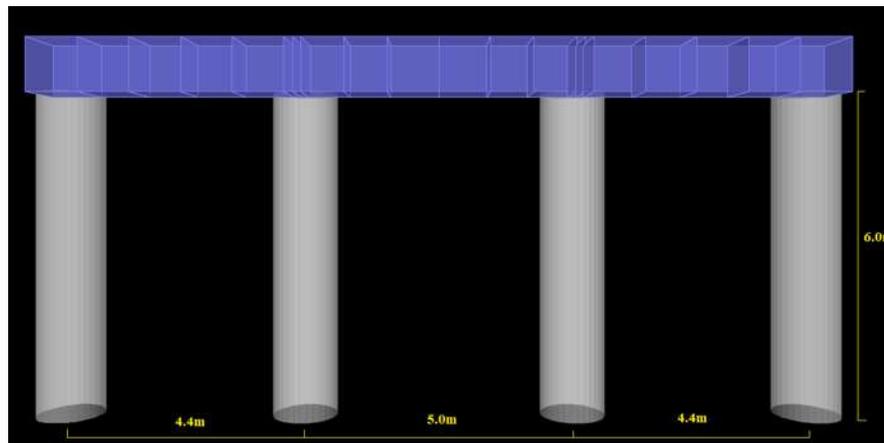


Figura 14.- Marcos de subestructura



1.4.1.1.- Sección transversal de las columnas.

Las columnas están formadas de una sección circular de 1.2m de diámetro, con 29 varillas de acero longitudinal del No 14, lo cual representa un porcentaje de acero del 3.85%. Se colocaron varillas de No 5 para el acero transversal a cada 0.15m, como se muestra en la FIGURA 11. En la Sección 5.1 se muestra cómo se realizó el diseño de la columna.

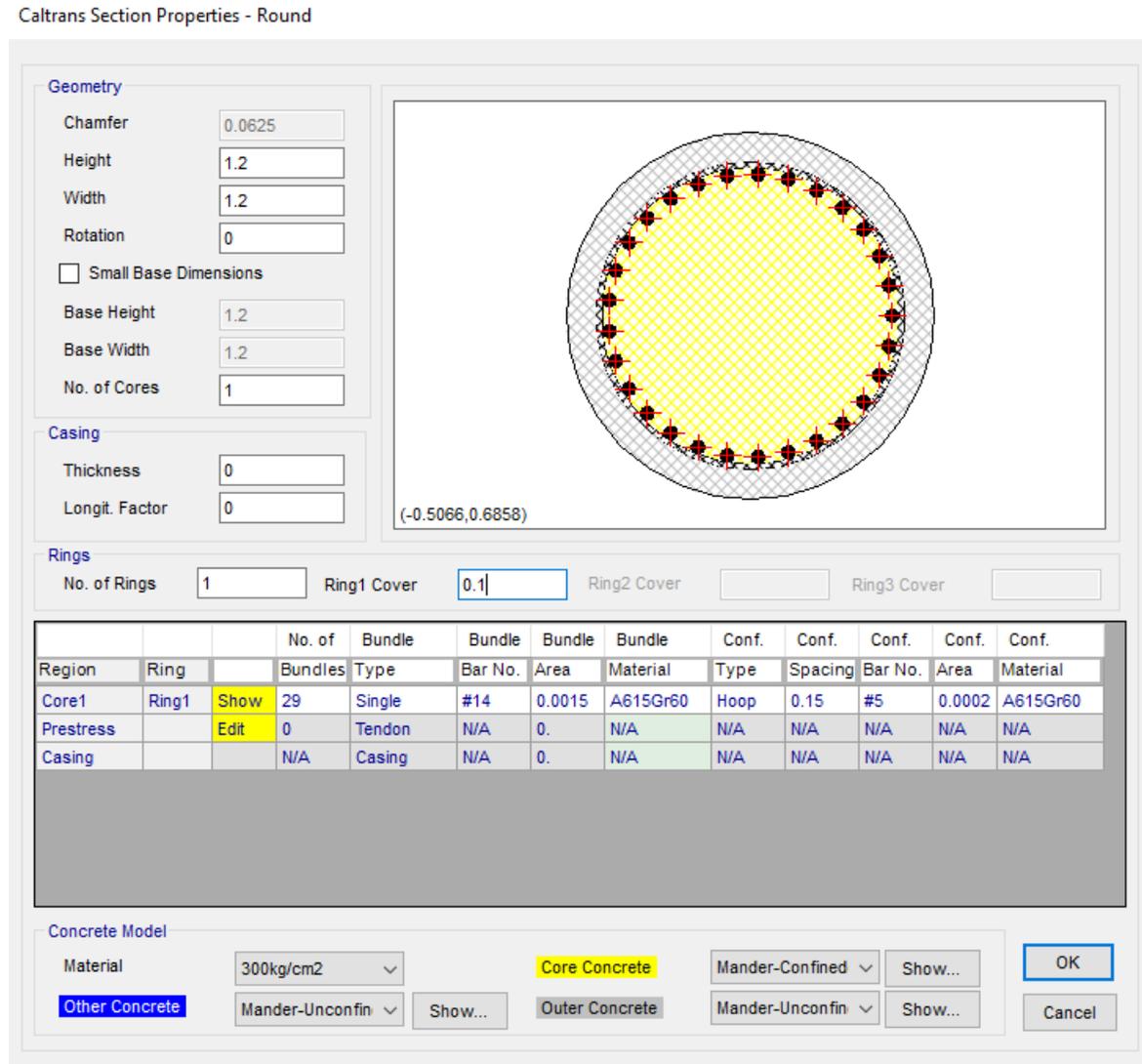


Figura 15.- Sección trasversal de columnas.



1.4.1.2.-Sección transversal de los cabezales

Los cabezales son elementos tipo viga apoyados sobre las columnas con una sección transversal de 1.2m de ancho por 1 metro de peralte, se modelan como se muestra en la FIGURA12.

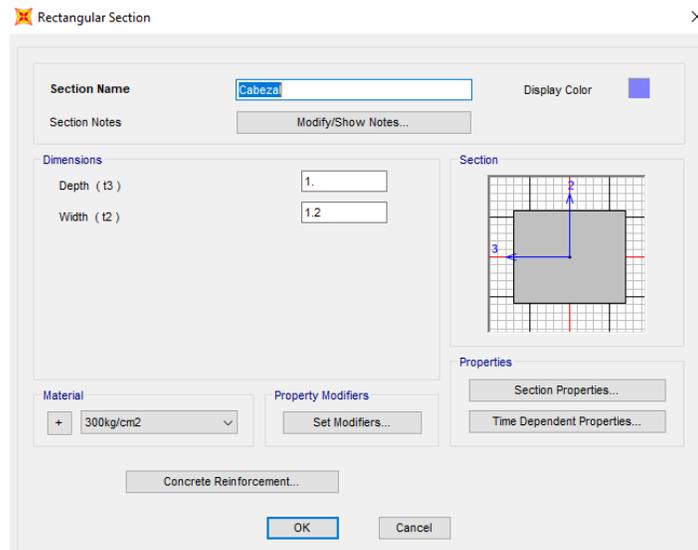


Figura 16.- Cabezal

1.4.2.- Superestructura

La superestructura (FIGURA 13) está compuesta en cada claro por ocho vigas AASHTO tipo IV apoyadas sobre los elementos tipo link, con una separación de sus ejes centroidales de 1.875m; las vigas diafragma se conectan de manera transversal a las traveses longitudinales aumentando la rigidez del sistema.

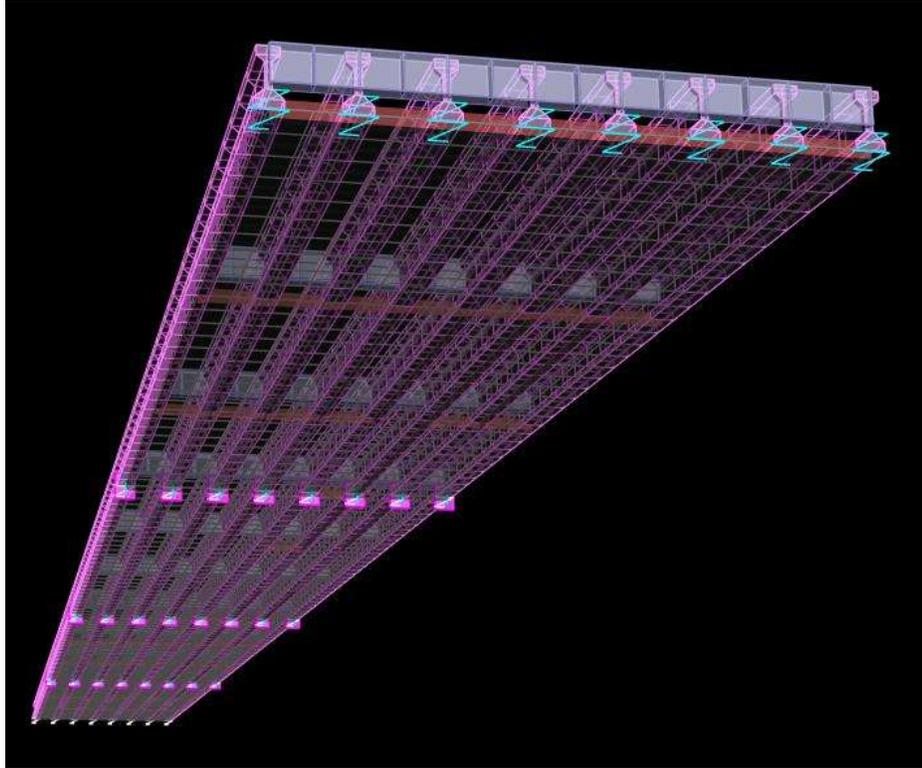


Figura 17.- Superestructura

1.4.2.1.- Sección transversal de las vigas tipo AASHTO tipo IV.

Las vigas tipo AASHTO son elemento presforzados muy usados en el diseño de puentes. Las vigas son fabricadas en medidas desde los 21m hasta los 30 metros, en este caso se consideran con una longitud de 30m. La limitación de los 30 metros es únicamente por los problemas de transportación carretera para longitudes mayores.

Sap2000 tiene una sección especial para modelar estos elementos en los cuales únicamente se agregan las medidas deseadas como se muestra en la [FIGURA 14](#).

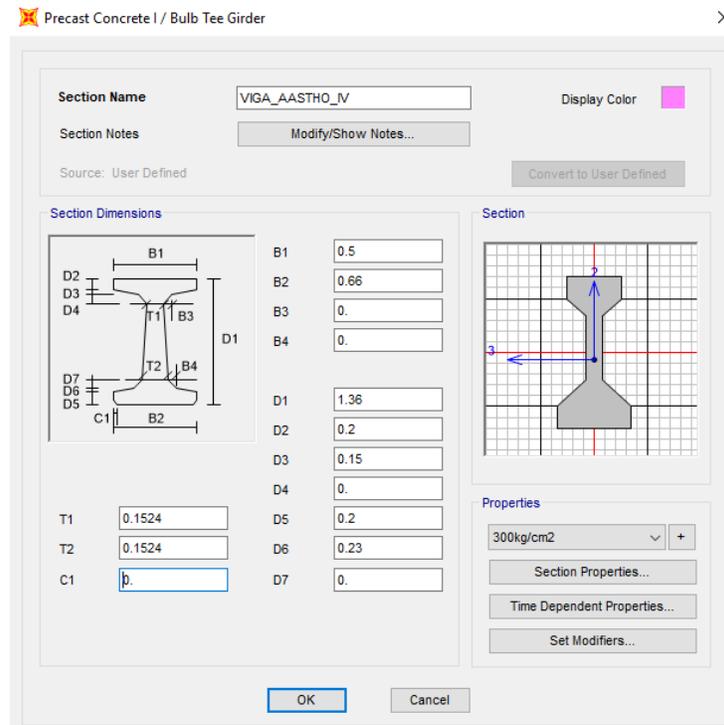


Figura 18.- Viga AASTHO tipo iv

1.4.2.2.- Sección transversal de diafragmas.

Los diafragmas son elementos conectados en la parte superior de las vigas AASHTO, los cuales cumplen la función de agregar rigidez lateral al sistema. Su sección transversal se modeló como se muestra en la FIGURA 15.

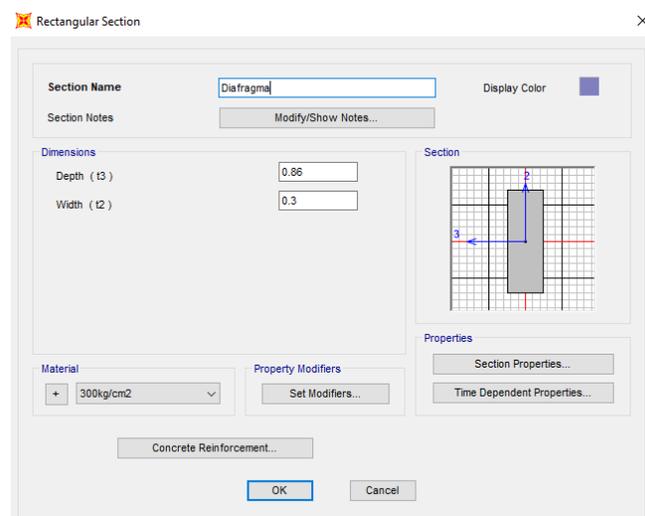


Figura 19.- Diafragma de rigidez



1.4.2.3.- Sección de la losa de concreto

La losa de concreto, sobre la cual se apoyan la carpeta de rodamiento y los elementos que son necesarios para el funcionamiento de un puente vehicular, se modela como se muestra en la

FIGURA 16.

1.4.3.- Definición de los elementos tipo link en Sap2000.

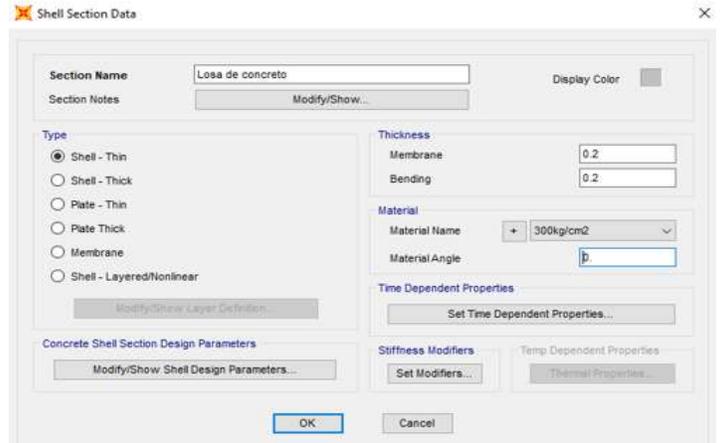


Figura 20.- Losa de concreto

Lo elementos tipo link representan distintos dispositivos con características específicas en su comportamiento. En este caso se utilizan para modelar cuatro elementos: apoyos de neopreno fijo, apoyo de neopreno móvil, juntas de dilatación y aisladores con núcleo de plomo. La manera de diseñar y calcular las rigideces de estos elementos se muestra más adelante en la sección XXX.

Para este trabajo se desprecia la masa de los elementos tipo link, debido a que su masa y peso son muy bajos comparados con los totales del sistema.

1.4.3.1.- Apoyos de neopreno fijos, modelo 1.

Cada viga tipo AASHTO se encuentra apoyada en sus extremos un apoyo fijo y uno móvil. El apoyo de neopreno fijo tiene una rigidez más alta al apoyo de neopreno móvil, lo cual permite que frente a fuerzas horizontales el apoyo fijo tenga menor desplazamiento. En la **FIGURA 17- 18** se muestra el elemento link utilizado, tipo “Lineal”, con las características que se despliegan. Para incluir estos elementos en el modelo estructural, se deben proporcionar las rigideces U1 (rigidez vertical), y las rigideces U2 Y U3 (rigideces horizontales).



Link/Support Property Data

Link/Support Type: Linear

Property Name: Apoyo_Neopreno_Fijo

Property Notes: [Empty]

Total Mass and Weight

Mass	0.	Rotational Inertia 1	0.
Weight	0.	Rotational Inertia 2	0.
		Rotational Inertia 3	0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for All...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	

P-Delta Parameters: Advanced...

Buttons: OK, Cancel, Fix All, Clear All

Figura 22.- Definición de apoyos de neopreno fijos.

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name: [Empty]

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
4458920	286800	286800			

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.	0.	0.			

Shear Distance from End J

U2	U3
0.01	0.01

Units: Kgf, m, C

Buttons: OK, Cancel

Figura 21.- Rigidez de apoyos de neopreno fijos.

1.4.3.2.- Apoyos de neopreno móviles, modelo 1.

Los apoyos de neopreno móviles, al igual que los apoyos de neopreno fijos son modelados con elementos link tipo “Lineal”, pero como ya se mencionó su rigidez es menor (por tener un espesor mayor), esto permite que la viga no tenga total restricción horizontal en sus extremos y se puedan presentar pequeños desplazamientos horizontales, ya sean por fuerzas

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name: [Empty]

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
3170790	203940	203940			

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
0.	0.	0.			

Shear Distance from End J

U2	U3
0.01	0.01

Units: Kgf, m, C

Buttons: OK, Cancel

Figura 23.- Rigidez apoyos de neopreno móviles.



externas o por dilatación de los materiales. Las rigideces de estos elementos móviles se muestran en la FIGURA 19.

1.4.3.3.- Juntas de dilatación, modelo 1.

Las juntas de dilatación son elementos necesarios en los puentes para permitir los desplazamientos horizontales en la losa debido a la dilatación por los cambios de temperatura. En sap2000 se modelan usando elementos link tipo “GAP”, de esta misma manera fueron nombrados en este trabajo. La rigidez importante en este elemento es la que presenta a lo largo de su eje axial, debido a que su trabajo es básicamente comprimirse y descomprimirse y fue considerado con una abertura de 0.04m. Su modelación numérica en Sap2000 fue realizada como se muestra en las Figuras 20 y Figura 21. El elemento tipo GAP no aporta rigidez lateral hasta que el desplazamiento relativo entre dos tableros consecutivos sea mayor que la establecida en el modelo (0.04 m, en este caso).

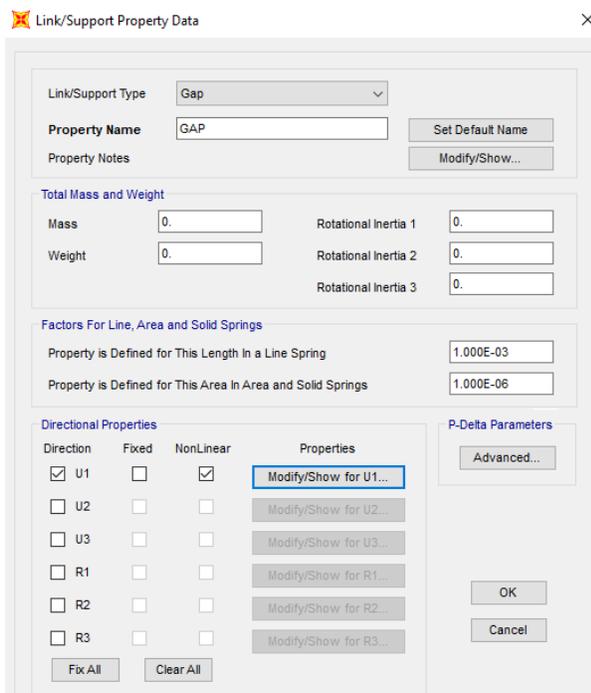


Figura 25.-Definición de juntas de dilatación.

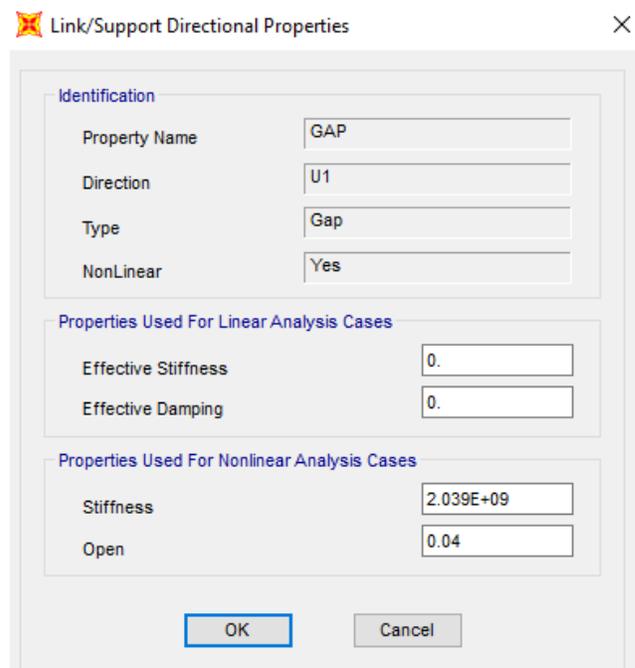


Figura 24.- Apertura y rigidez de las juntas de dilatación.



1.4.3.4.- Aisladores sísmicos con núcleo de plomo, modelo 2.

Los aisladores de sísmicos con núcleo de plomo son dispositivos formados de capas intercaladas de caucho natural y láminas de acero, en su centro el dispositivo tiene un corazón de plomo el cual aporta disipación por comportamiento histerético. En este trabajo son considerados aisladores circulares por lo que su rigidez horizontal es igual en dos direcciones ortogonales (U2 y U3).

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Rubber Isolator

Property Name: Aisl_25.5cm

Property Notes: [Empty]

Total Mass and Weight

Mass: 0. Rotational Inertia 1: 0.

Weight: 0. Rotational Inertia 2: 0.

Rotational Inertia 3: 0.

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

P-Delta Parameters: Advanced...

Buttons: Fix All, Clear All, OK, Cancel

Figura 26.- Definición de LRB.

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Aisl_25.5cm

Direction: U2

Type: Rubber Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 137304.79

Effective Damping: 18354.891

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 0.41

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 966374.8

Yield Strength: 18340.126

Post Yield Stiffness Ratio: 0.1

Buttons: OK, Cancel

Figura 27.- Propiedades laterales del LRB.

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: Aisl_25.5cm

Direction: U1

Type: Rubber Isolator

NonLinear: No

Properties Used For All Analysis Cases

Effective Stiffness: 71380133.

Effective Damping: 0.

Buttons: OK, Cancel

Figura 28.- Propiedades verticales del LRB.



2.- Fuerzas actuantes y combinaciones de fuerzas.

Para realizar el diseño de cualquier estructura es necesario considerar las cargas que estarán actuando, ya sea que estén presentes de manera permanente o de manera eventual. En este capítulo se describen las cargas y las combinaciones consideradas para este trabajo.

2.1.- Fuerzas actuantes.

2.1.1.-Cargas permanentes consideradas.

Cargar Muerta. – Es la carga producida por el peso propio de la estructura. Esta carga la calcula de manera automática el programa sap2000, por lo cual no es necesario agregar ninguna fuerza extra en ella.

Cargar muerta de pavimento. - Es la carga originada por el peso propio de la carpeta de rodamiento, la cual descansa sobre la losa de concreto. Para esta carga se considera un peso volumétrico del asfalto de $2,000 \text{ kg/m}^3$ por lo tanto si se tiene un espesor de 0.10 m . El peso de asfalto que soportará la losa de concreto es igual a $2,000 \text{ kg/m}^3 \times 0.10 \text{ m} = 200 \text{ kg/m}^2$. Lo cual es el peso que se ingresa en el programa sap2000 sobre la losa de concreto.

Carga muerta parapeto. – Los parapetos son elementos que dan seguridad en algún lugar con cierta altura impidiendo las caídas; un ejemplo de estos elementos son los barandales de concreto usados en las terrazas. En el caso de los puentes son elementos de concreto colocados en los bordes horizontales brindando contención para evitar caídas de vehículos. La sección transversal de los parapetos considerados en este trabajo tiene las dimensiones que se muestran en la Figura 22. Tienen un área de sección transversal igual a 0.195 m^2 . Por metro lineal tienen un volumen de 0.195 m^3 , por lo que su peso es: $2,400 \text{ kg/m}^3$ no resulta $\frac{2,400 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times 0.195 \text{ m}^3 = 468 \text{ kg}$. Esta es el peso de un metro lineal de parapeto, la base del parapeto mide $0.4 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 0.4 \text{ m}^2$.

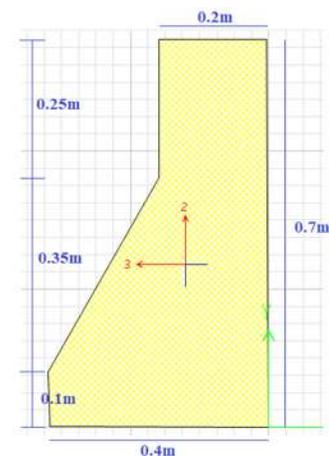


Figura 29.- Sección transversal del parapeto.

Por lo tanto, el peso del parapeto se considera $468 \text{ kg} / 0.4 \text{ m}^2 =$



1,170 kg/m², lo cual se carga en la zona de la losa de concreto donde son considerados los parapetos.



2.1.2.- Cargas móviles consideradas.

Las cargas móviles consideradas, son las que se generan debido al tránsito vehicular. En Estados Unidos, la American Association of State Highway and Transportation Officials (ASSHTO), es la asociación encargada de definir estas cargas. Definen dos tipos de vehículos, los H correspondientes a un camión sencillo, y los HS correspondientes a un camión con semirremolque. En este trabajo se considera un vehículo tipo HS-20, el cual tiene cargas que se muestran en la [FIGURA 28](#). Sin embargo, en México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) es quien emite la normativa para cargas en puentes, la cual emplea cargas correspondientes a vehículos reales que circulan en el país, tales como T3-S2-R4 T3-S3. Estos últimos son también considerados en este trabajo, sus ejes y cargas se muestran en la [FIGURA 29](#) Y [FIGURA 30](#) respectivamente.

2.1.3.- Cargas accidentales.

Las cargas accidentales son aquellas que se presentan de manera eventual a lo largo de la vida de una estructura, sin embargo, pueden ser dinámicas y de grandes amplitudes. Las fuerzas accidentales más comúnmente consideradas son la acción por nieve o hielo, acción por viento y acción por sismo. En estructuras de puentes como los aquí estudiados, los efectos más importantes son los causados por la acción de las fuerzas sísmicas, por lo tanto, sólo se consideran fuerzas sísmicas dentro de las cargas accidentales.



2.1.3.1.- Carga accidental por efecto sísmico.

Las fuerzas sísmicas en las estructuras son causadas por las aceleraciones del terreno producidas por los temblores. Estas dependen de gran cantidad de factores y son completamente impredecibles. Gracias a los estudios geológicos y de instrumentación sísmica, se sabe que los sismos son producidos principalmente en las zonas más cercanas a las placas tectónicas, siendo aquí donde se presentan los desplazamientos entre placas que liberan la energía sísmica. En México, en la zona costera del océano pacífico se encuentran las fronteras entre tres placas tectónicas, la placa del pacífico, la placa de cocos y la placa norteamericana; esto produce gran actividad sísmica en toda esta costa mexicana del pacífico (FIGURA 26). Para comprender mejor el fenómeno sísmico, se han ido colocando, partir de 1960,



varios acelerógrafos en el país, los cuales generan un registro de las aceleraciones sísmicas que son almacenados en bases de datos.



Figura 31.- Mapa de actividad sísmica en México (Obtenido del software Prodisis de la CFE)

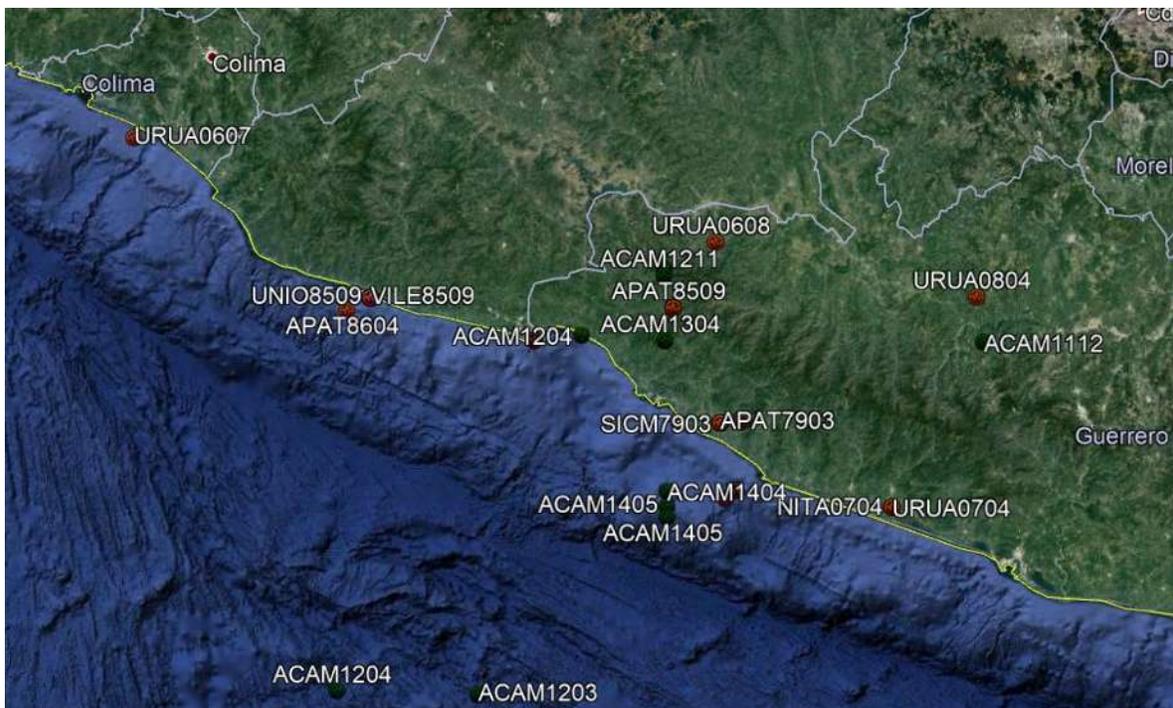


Figura 30.- Epicentro de sismos considerados.



Hoy en día se cuenta con una gran cantidad de registros sísmicos tanto cercanos al epicentro como alejados del mismo. En este trabajo se consideran 15 registros sísmicos de distancia cercana a la costa (TABLA 1), 10 registros de distancia media (TABLA 2), y 10 acelerogramas de distancia lejana (TABLA 3). Estos registros tienen todos sus epicentros en la zona costera del país y las TABLAS 1 - 3 muestran algunas características relativas a los eventos.

Tabla 1.- Registros sísmicos de distancia cercana al epicentro.

DATOS DE ACELEROGRAMAS DISTANCIA CERCANA AL EPICENTRO									
Nombre del archivo	Estación	Ubicación	Tipo de suelo	Fecha del sismo	Epicentro	Foco (km)	Duración (s)	Magnitud	Acel Máx. (Gal)
AZIH8509.211	AEROPUERTO ZIHUATANEJO	17.60654 LAT. N 101.46526 LONG. W	Roca	21/09/1985	18.021 LAT. N 101.479 LONG. W	15	33.86	/Mb=6.30/ Ms=7.60/M c=7.50	/95.02/133. 14/-158.23
NUX21404.182	NUXCO 2	17.216711 LAT. N 100.79117 LONG. W	Roca	21/09/1985	18.021 LAT. N 101.479 LONG. W	15	33.86	/Mb=6.30/ Ms=7.60/M c=7.50	/1331/1508/ 1591
PAPN8509.191	PAPANOA	17.328 LAT. N 101.040 LONG. W	Roca	19/09/1985	18.081 LAT. N 102.942 LONG. W	15	89.29	/Mb=6.80/ Ms=8.10/M c=8.10	/- 80.68/111.6 1/154.95
PAPN8802.081	PAPANOA	17.328 LAT. N 101.040 LONG. W	Roca	08/02/1988	17.494 LAT. N 101.157 LONG. W	19	40.81	/Mb=5.50/ Ms=5.70/M c=5.00	/-223.94/ 338.69/433. 70
PAPN9712.221	PAPANOA	17.328 LAT. N 101.040 LONG. W	Roca	22/12/1997	17.140 LAT. N 101.240 LONG. W	5	105	/Mb=5.10/ Ms=5.0/Mc =4.6	/-406.29/ 179.58/244. 65
PET21404.182	PETATLAN II	17.535396 LAT. N 101.262608 LONG. W	Roca	18/04/2014	17.18 LAT. N 101.19 LONG. W	10	291	/M=7.2	/407.11/217 .59/217.95
SICC7903.141	SICARTSA CASETA TESTIGO	17.933 LAT. N 102.200 LONG. W	N.E.	14/03/1979	17.490 LAT. N 101.260 LONG. W	28	21.28	/Mb=7.00	/264.280/ 66.794/307. 215
SICC8110.251	SICARTSA CASETA TESTIGO	17.933 LAT. N 102.200 LONG. W	N.E.	25/10/1981	17.880 LAT. N 102.150 LONG. W	14	33.72	/Mb=6.10/ Ms=7.30	/- 265.695/0.0 00/249.088
SICM7903.141	SICARTSA CASETA MAESTRO	17.933 LAT. N 102.200 LONG. W	N.E.	14/03/1979	17.490 LAT. N 101.260 LONG. W	28	21.26	/Mb=7.00	/- 254.986/71. 915/ 293.416
SICS7903.141	SICARTSA ACERACION	17.933 LAT. N 102.200 LONG. W	ESTRUCTUR A METALICA	14/03/1979	17.490 LAT. N 101.260 LONG. W	28	22.5	/Mb=7.00	/132.330/52 .006/ 153.154
SICS8110.251	SICARTSA ACERACION	17.933 LAT. N 102.200 LONG. W	ESTRUCTUR A METALICA	25/10/1981	17.880 LAT. N 102.150 LONG. W	14	35.04	/Mb=6.10/ Ms=7.30	0.000/ 83.389/130. 790
SLU21404.182	SAN LUIS DE LA LOMA 2	17.280802 LAT. N 100.935496 LONG. W	Roca	18/04/2014	17.18 LAT. N 101.19 LONG. W	10	437	/M=7.2	/402.25/279 .99/-418.64
UNIO8509.191	LA UNION	17.98762 LAT. N 101.810623 LONG. W	Roca	19/09/1985	18.081 LAT. N 102.942 LONG. W	15	62.89	/Mb=6.80/ Ms=8.10/M c=8.10	/4684/4009/ 4736
VILE8509.191	VILLITA MARGEN DERECHA	18.045264 LAT. N 102.188937 LONG. W	Roca	19/09/1985	18.081 LAT. N 102.942 LONG. W	15	64.31	/Mb=6.80/ Ms=8.10/M c=8.10	/122.54/58. 40/-125.17
ZACA8509.191	ZACATULA	18.009 LAT. N 102.178 LONG. W	Arcilla compacta	19/09/1985	18.081 LAT. N 102.942 LONG. W	15	146.38	/Mb=6.80/ Ms=8.10/M c=8.10	/-147.38/ 174.18/262. 23



Tabla 3.- Registros sísmicos de distancia media a la costa.

DATOS DE ACELEROGRAMAS DISTANCIA MEDIA AL EMPICENTRO									
Nombre del archivo	Estación	Ubicación	Tipo de suelo	Fecha del sismo	Epicentro	Foco (km)	Duración (s)	Magnitud	Acel Máx. (Gal)
APAT7903.141	APATZINGAN	19.083 LAT. N 102.350 LONG. W	N.E.	14/03/1979	17.490 LAT. N 101.260 LONG. W	28	/10.88/17.5 6/11.9	/Mb=7.00	-62.217
APAT8110.251	APATZINGAN	19.083 LAT. N 102.350 LONG. W	N.E.	25/10/1981	17.880 LAT. N 102.150 LONG. W	14	37.38	/Mb=6.10/ Ms=7.30	96.548
APAT8509.211	APATZINGAN	19.083 LAT. N 102.350 LONG. W	N.E.	21/09/1985	18.021 LAT. N 101.479 LONG. W	15	13.64	/Mb=6.30/ Ms=7.60/M c=7.50	-20.796
APAT8509.191	APATZINGAN	19.083 LAT. N 102.350 LONG. W	N.E.	19/09/1985	18.081 LAT. N 102.942 LONG. W	15	88.42	/Mb=6.80/ Ms=8.10/M c=8.10	81.282
APAT8604.301	APATZINGAN	19.083 LAT. N 102.350 LONG. W	N.E.	30/04/1986	18.024 LAT. N 103.057 LONG. W	20	47.58	/Mb=6.20/ Ms=7.00/M c=6.40	-52.341
NITA0704.131	NUEVA ITALIA	19.020738 LAT. N 102.085089 LONG. W	ROCA	13/04/2007	17.09 LAT. N 100.44 LONG. W	41	85	/M=6.3	-13.47
URUA0608.111	URUAPAN	19.421758 LAT. N 102.074059 LONG. W	ROCA	11/08/2006	18.32 LAT. N 101.27 LONG. W	51	126	/M=5.9	11.81
URUA0704.131	URUAPAN	19.421758 LAT. N 102.074059 LONG. W	ROCA	13/04/2007	17.09 LAT. N 100.44 LONG. W	41	102	/M=6.3	-4.63
URUA0804.281	URUAPAN	19.421758 LAT. N 102.074059 LONG. W	ROCA	28/04/2008	18.05 LAT. N 100.01 LONG. W	52	121	/M=5.6	1.25
URUA0607.311	URUAPAN	19.421758 LAT. N 102.074059 LONG. W	ROCA	31/07/2006	19.421758 LAT. N 102.074059 LONG. W	10	81	/M=5.2	-2

Tabla 2.- Registros sísmicos de distancia lejana a la costa.

DATOS DE ACELEROGRAMAS DISTANCIA LEJANA AL EPICENTRO									
Nombre del archivo	Estación	Ubicación	Tipo de suelo	Fecha del sismo	Epicentro	Foco (km)	Duración (s)	Magnitud	Acel Máx. (Gal)
ACAM1211.15 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	15/11/2012	18.17 LAT. N 100.52 LONG. W	40	194	/M=6.1	0.9
ACAM1112.11 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	11/12/2011	17.84 LAT. N 99.98 LONG. W	58	215	/M=6.5	1.82
ACAM1203.20 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	20/03/2012	16.251 LAT. N 98.521 LONG. W	16	317	/M=7.4	4.06
ACAM1204.11 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	11/04/2012	17.9 LAT. N 103.06 LONG. W	16	212	/M=6.4	-1.66
ACAM1204.02 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	02/04/2012	16.27 LAT N 98.47 LONG W	10	155	/M=6.0	-0.57
ACAM1205.01 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	01/05/2012	18.2 LAT. N 101.01 LONG. W	51	185	/M=5.6	1.53
ACAM1304.22 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	22/04/2013	17.87 LAT. N 102.19 LONG. W	10	201	/M=5.8	2.01
ACAM1404.18 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	18/04/2014	17.18 LAT. N 101.19 LONG. W	10	297	/M=7.2	9.45
ACAM1405.10 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	10/05/2014	17.06 LAT. N 100.95 LONG. W	12	212	/M=6.1	1.71
ACAM1405.08 1	ACAMBARO	20.043186 LAT. N 100.716777 LONG. W	ROCA	08/05/2014	17.11 LAT. N 100.87 LONG. W	17	259	/M=6.4	/3.60



2.2.- Tipos de análisis y combinaciones de carga.

Para el diseño de los elementos estructurales del puente se utilizaron las combinaciones de carga señaladas en las normas AASHTO (2012). Estas son, por resistencia I, el evento extremo I en dirección X y evento extremo I en dirección Y. Adicionalmente, posteriormente al diseño elástico, se realizan análisis estáticos no lineales.

Tipos de análisis

2.2.1.- Análisis estático lineal

El análisis estático lineal es la base para obtener los elementos mecánicos de diseño en todos los elementos estructurales del puente. Los análisis lineales regularmente se realizan de manera relativamente simple sin necesidad de un gran poder de procesamiento de un equipo de cómputo. Los análisis de carga estáticos lineales se realizan para las combinaciones de carga que incluyen cargas muertas, cargas vivas y sismo a través del método estático o el método dinámico modal espectral.

2.2.2.- Análisis modal.

Las características dinámicas del puente se determinan a través del análisis modal y como resultado se obtienen las frecuencias de vibración y sus modos de vibrar. El programa sap2000 tiene incorporado este análisis, por lo cual, si se requieren más de doce modos, sólo es necesario modificar la cantidad de modos de vibrar que se calculan. En este trabajo se consideran 36 modos de vibrar.



2.2.3.- Análisis de cargas móviles.

Los análisis de cargas móviles en sap2000 son nombrados de manera homónima, para definirlos, es necesario definir los vehículos ya mencionados en la sección 3.2 y los carriles por los que se considera circularán esos vehículos. Para esto sap2000 tiene un apartado especial llamado “móvil loads” en este apartado se definen las cargas vehiculares y sus líneas de acción.

Para definir las cargas vehiculares únicamente se ingresan datos en dos columnas, una para definir la distancia entre ejes y la otra para la carga que representa cada eje. De tal manera que los vehículos de quedan definidos como se muestra en las [FIGURAS 29 - 30](#).

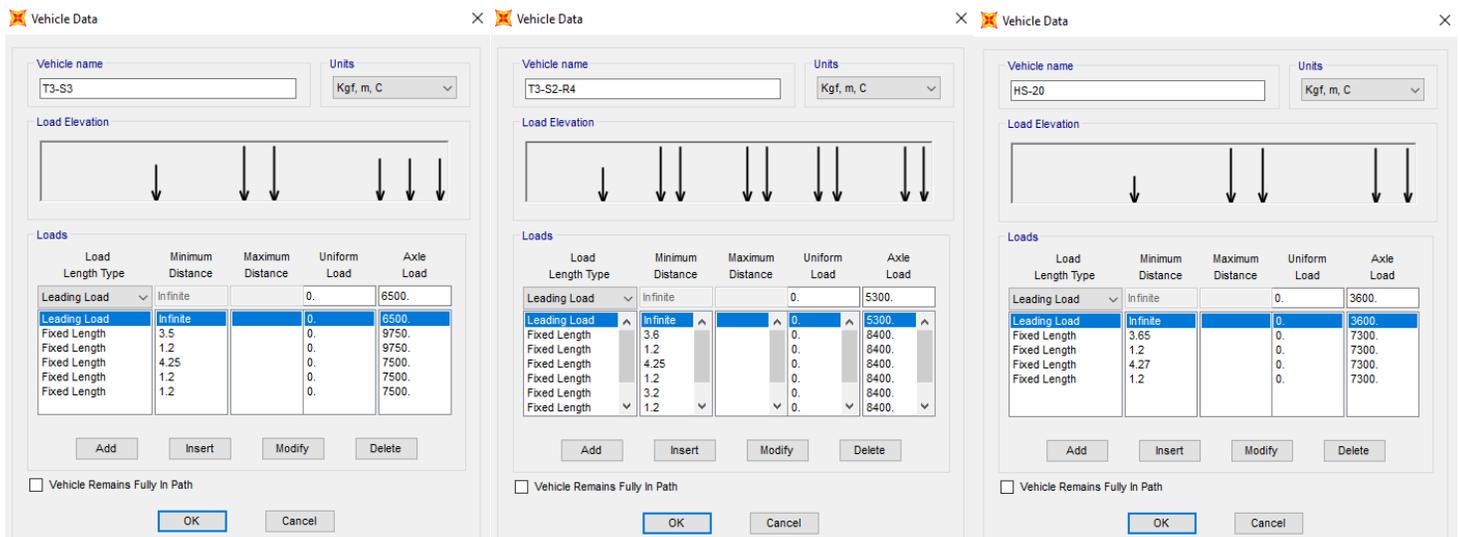


Figura 34.- Carga vehicular T3-S3

Figura 32.- Carga vehicular T3-S2-R4

Figura 33.- Carga vehicular HS-20

Para definir las líneas donde actúan dichas cargas, se crea una barra sin propiedades que atraviesa longitudinalmente la losa de concreto, ubicada justo en la parte central de la misma, sobre la cual se considera de manera positiva o negativa según sea el caso un desfase para definir los cuatro carriles considerados. La definición de los mismos se muestra en la [TABLA 4](#).



Tabla 4.- Desfase de líneas de acción de carga

Carriles	Distancia desfasada en x de línea central (m)	
Path1	-4.4	-6.2
Path2	-1.6	-3.4
Path3	1.6	3.4
Path4	4.4	6.2

2.2.4.- Análisis sísmico espectral.

Para crear este tipo de análisis en sap2000, es necesario definir la función deseada, en este caso es una función de espectro de respuesta, sap2000 es un software en idioma inglés por lo tanto las funciones se definen con: Define > Functions > Response Spectrum. En esta sección se capturan espectros de diseño o de respuesta sísmica según una gran variedad de normas internacionales. A partir de la versión sap2000 v18 también se pueden definir espectros de normas mexicanas ya incluidas: CFE – 93, CFE – 2008 Y NTC – 2004. En este trabajo definiremos los espectros de respuesta usando la opción “From file” la cual nos permite importar un archivo tipo texto que contenga las aceleraciones del espectro de respuesta elástico.

Un espectro de respuesta es una gráfica en la que se representan las respuestas máximas de un sistema de un grado de libertad ya sean aceleraciones, velocidades o desplazamientos, como función del periodo del sistema. Usualmente los espectros se forman por pseudoaceleraciones en el eje de las ordenadas y periodos de vibración en las abscisas.

Para obtener dicho espectro es necesario considerar una estructura simple o de un grado de libertad con diferentes periodos de vibración, desde periodos muy bajos hasta periodos considerados grandes, generalmente se representan desde los 0 segundos hasta los 10 segundos. Estas estructuras simples son sometidas a las vibraciones sísmicas de un acelerograma, y el máximo absoluto obtenido en cada una de las estructuras a diferentes periodos representa un punto en la gráfica del espectro (FIGURA 31).

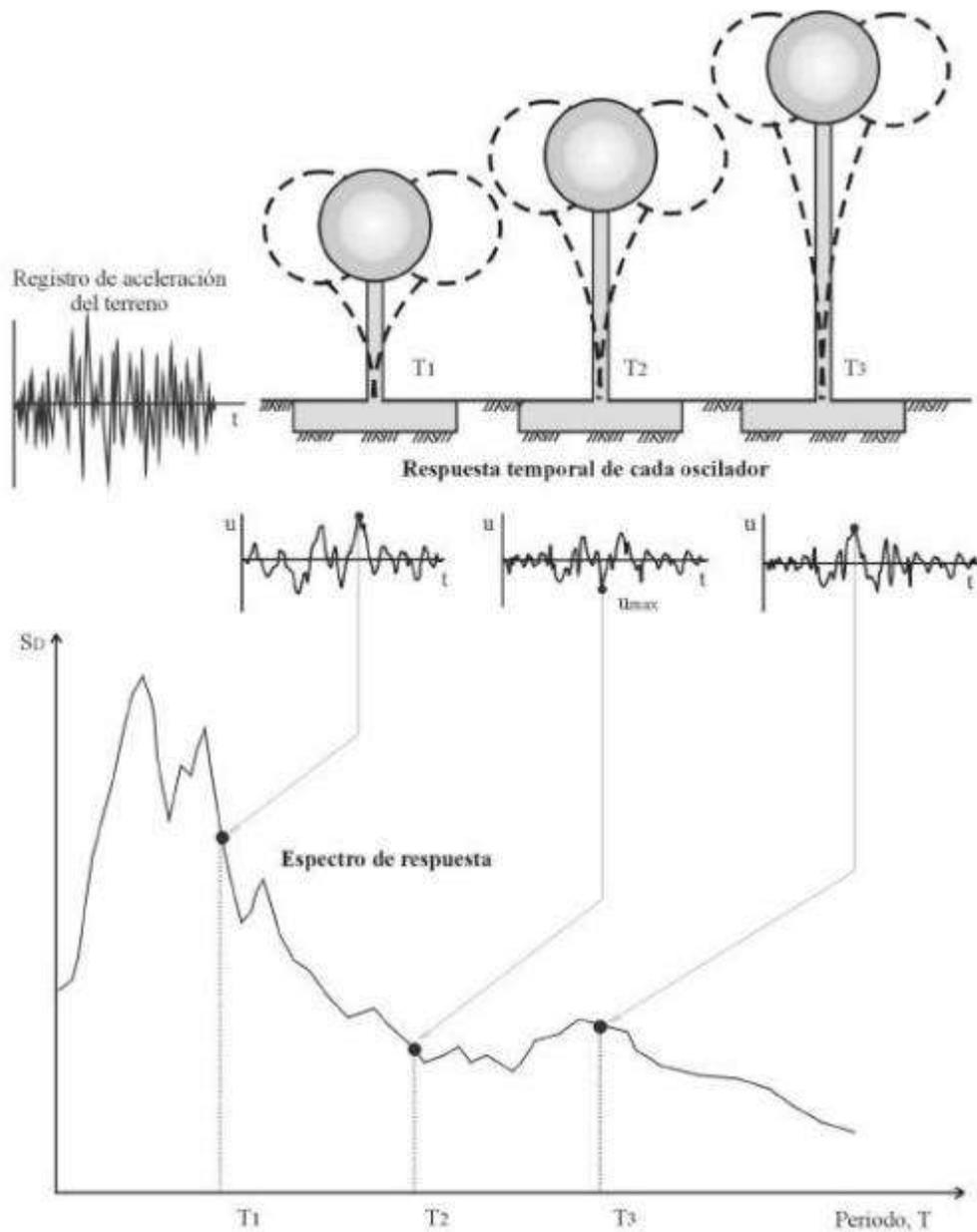


Figura 35.-.- Creación de espectro elástico (Imagen obtenida de Guía de Estudio ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO, Universidad Nacional de Cuyo Facultad de Ingeniería, Francisco Crisafulli, Elbio Villafañe)

Este procedimiento para crear los espectros se realizó con ayuda del software “SeismoSignal V 4.3.0.” desarrollado por la empresa Seismosoft Ltd.



Para obtener estos espectros se descargaron los registros sísmicos que se muestran en las TABLAS 1 - 3. Cada uno de esos registros fue importado al software SeismoSignal en el cual uno de sus análisis es el cálculo de la intensidad de Arias. El cálculo de la intensidad de Arias es una medida de la intensidad del evento sísmico, con estos cálculos de energía liberada se puede reducir la cantidad de datos con los que se trabaja, considerando las aceleraciones desde el 5% hasta el 95% de la energía que libera el evento sísmico. Este 10% total que se reduce llega a reducir considerablemente la cantidad de datos con los que se trabaja, ya que la energía no se libera de manera lineal, y esta reducción se hace sin afectar relativamente nada al espectro resultante.

En la Figura 32 se muestra una gráfica con porcentaje de intensidad de Arias respecto al tiempo del registro sísmico, el porcentaje considerado ya con la reducción se encuentra entre las dos líneas rojas, como se puede apreciar se desprecian las aceleraciones desde 0 hasta 9 segundos, y de 21 segundos en adelante, llegando a una reducción de más del 60% de los datos con los que se trabaja, sin hacer a un lado la mayor intensidad del registro sísmico.

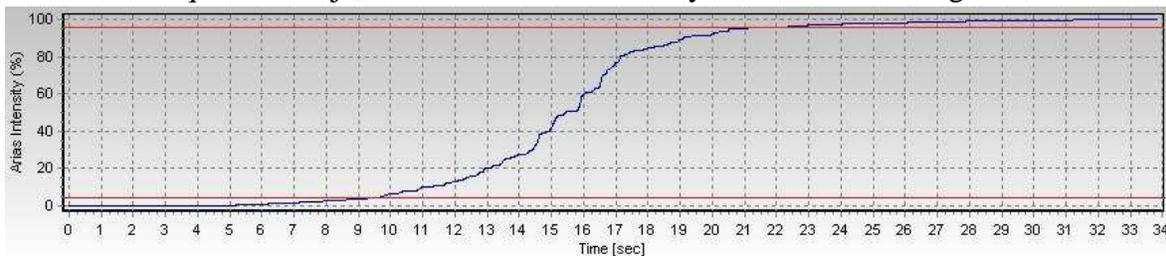


Figura 36.- Grafica de intensidad de Arias. Obtenida de acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985) Mb= 6.5

Una vez que se hizo la reducción con la intensidad de Arias, se abre en SeismoSignal el archivo ya reducido. El siguiente paso también ejecutado en el mismo software es realizar la corrección baseline o corrección en línea base, para corregir errores que se presenten por registro en el acelerograma con inicios diferentes a una aceleración cero. Esto puede ser inapreciable en las aceleraciones, pero puede ser importante en velocidades y desplazamientos, al ser obtenidos mediante la integración de las aceleraciones.

Como se muestra en la Figura 33, con el registro del aeropuerto de Zihuatanejo, sin hacer la corrección de línea base aparece un desplazamiento final de 200 metros, el cual es irreal, y se corrige (FIGURA 34) al aplicar la corrección de línea base.

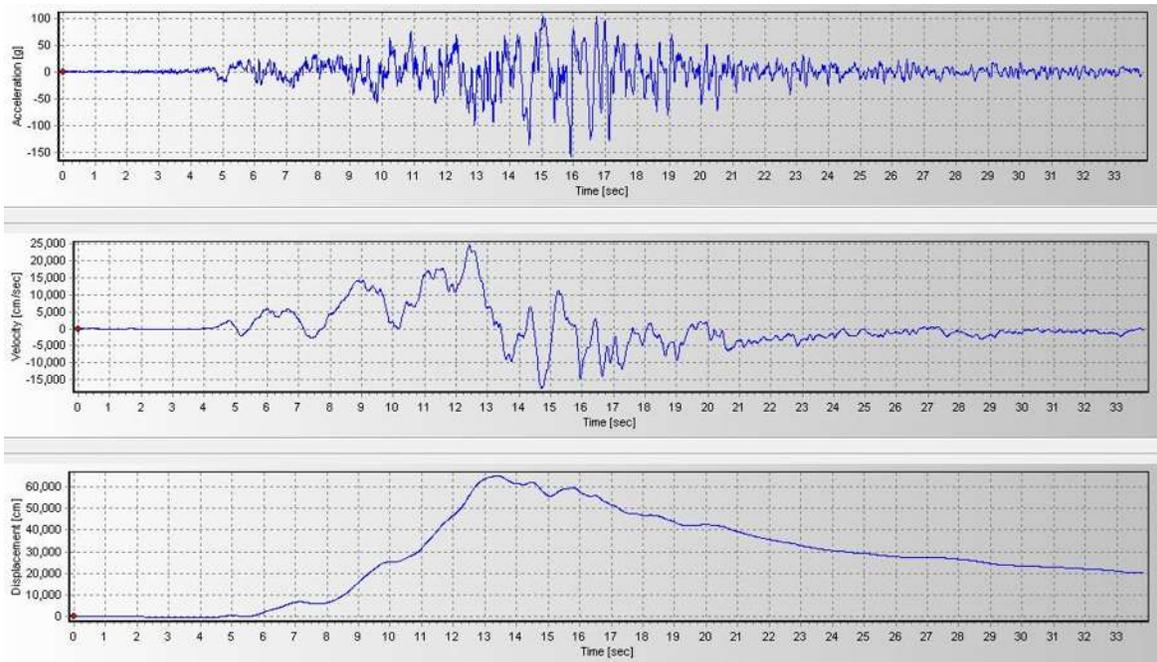


Figura 37.- Gráficas sin corrección de línea base. Obtenida de acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985) Mb= 6.5

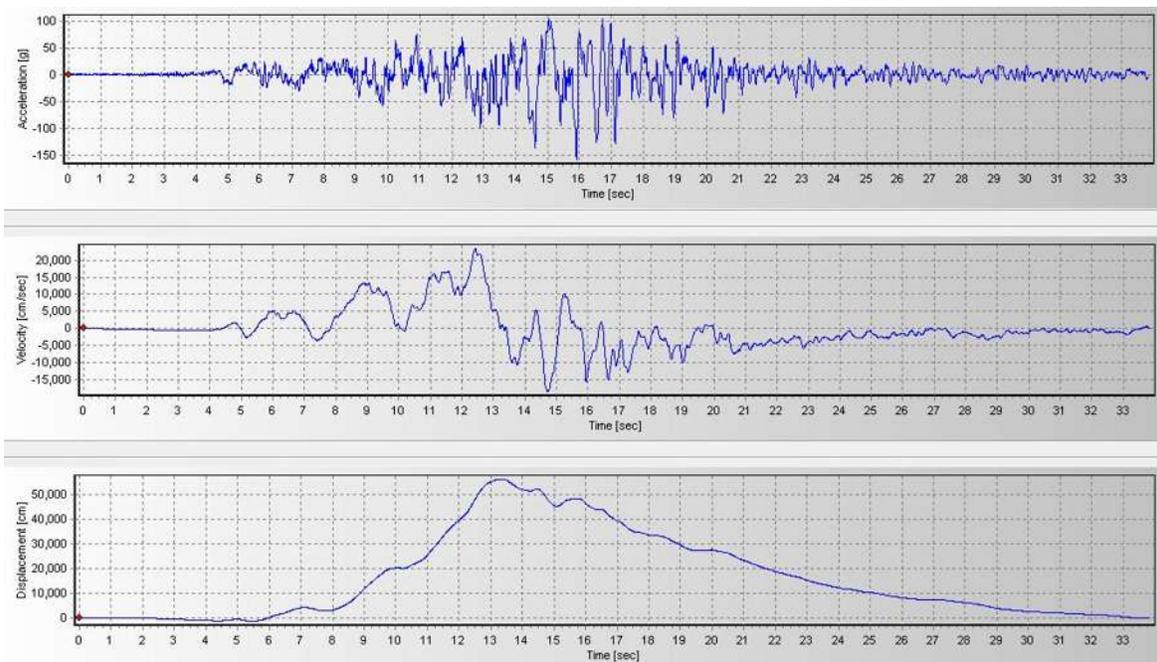
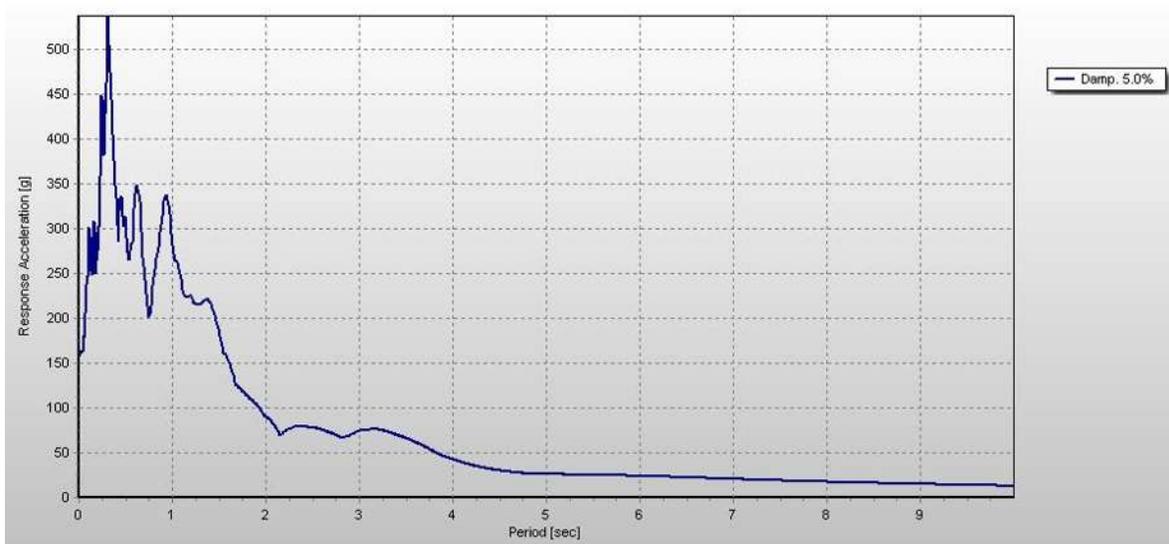


Figura 38.- Gráficas con corrección de línea base. Obtenida de acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985) Mb= 6.5



Una vez que ya se realizó la reducción por intensidad de Arias y la corrección de línea base, se exportan los datos del espectro elástico de aceleraciones (FIGURA 35). Este mismo procedimiento se realiza con todos los acelerogramas para obtener los datos de los 35 espectros elásticos con lo que se trabajará en sap2000.



**Figura 39.- Espectro elástico. Obtenido del acelerograma registrado en el aeropuerto de Zihuatanejo (21/09/1985)
Mb= 6.5**

Una vez ya ingresados los espectros de respuesta en sap2000, se proceden a crear dos casos de carga para cada uno, uno para cada dirección ortogonal U1 (X) y U2 (Y).



2.2.5.- Análisis estático no lineal.

A diferencia del análisis estático lineal, este tipo de análisis sí considera los cambios de rigidez que van presentando elementos estructurales por la fluencia de sus componentes. En el caso de puentes simplemente apoyados las columnas son los elementos que pueden ingresar a la zona de comportamiento inelástico, ya que sus desplazamientos horizontales pueden originar rótulas plásticas.

Este análisis debe realizarse en dos etapas. En el primero se aplican las cargas verticales,

definido en sap2000 como AENL_Vertical, sin incluir factores de carga (FIGURA 36).

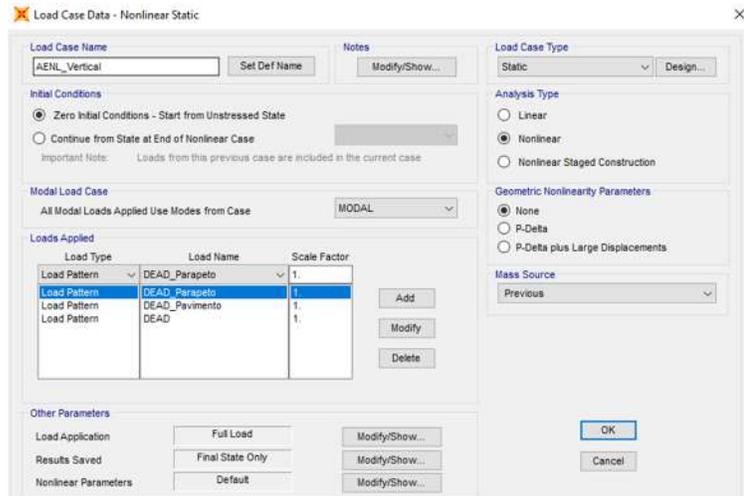


Figura 40.- Definición del análisis no lineal vertical.

El segundo es un análisis estático no lineal horizontal, que inicia a partir de la aplicación del AENL_Vertical, se aumenta gradualmente la aplicación de carga horizontal, con control de desplazamiento, hasta que el punto objetivo establecido alcance el desplazamiento deseado. Se definió en sap2000 con el nombre de AENL (FIGURA 37). Para este análisis es necesario proporcionar el diagrama momento-curvatura de cada columna, que depende de la sección transversal, armado longitudinal, transversal y la carga axial. Por ello, previamente se deben diseñar las secciones trasversales (SECCIÓN 4.2.1) con base en las cargas sobre cada una de las

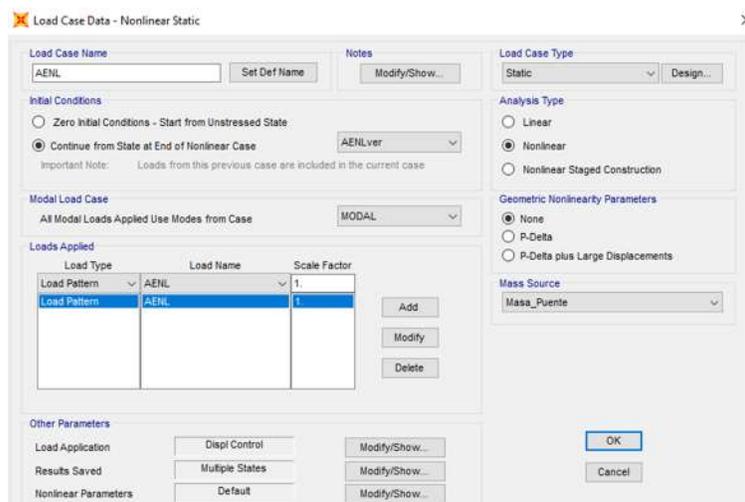


Figura 41.- Definición de análisis estático no lineal horizontal.



pilas (SECCIÓN 4.1.1). En la SECCIÓN 6 se muestra detalladamente el análisis estático no lineal realizado.

2.3.- Combinaciones de fuerzas.

Las combinaciones de carga son necesarias para el diseño de cualquier estructura, buscando considerar todas las acciones importantes. La filosofía de diseño de factores de carga y resistencia implica multiplicar por un factor de carga las acciones y por un factor de resistencia a los elementos mecánicos resistentes. En este trabajo se consideran tres combinaciones:

2.3.1.- Carga muerta.

En esta carga como se menciona anteriormente se considera el peso de total todos los elementos estructurales, así como los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del puente.

2.3.2.- Resistencia I.

Es una combinación con base a las especificaciones ASSHTO para diseño de puentes por el método LRFD 2012. Es una combinación de carga básica, relacionada con el uso normal del puente sin viento. De acuerdo a las especificaciones el efecto se debe tomar como la fuerza factorizada de la siguiente manera:

$$Q = \sum niyiQi$$

Donde:

ni = Factor de modificación de carga.

yi = Factor de carga

Qi = Solicitación de carga



Los factores de carga y_i se muestran en ASSHTO LRFD 2012 tabla 3.4.1 – 2, para las cargas muertas de este trabajo se muestran dos factores de carga (TABLA 5).

Tabla 5.- Factor de carga

Tipo de carga	Factor de carga	
	máx	mín
Elementos estructurales	1.25	0.9
Superficie y utilidades	1.5	0.65

Para las cargas móviles se usa un factor de carga distinto, este factor viene señalado en ASSHTO LRFD 2012 tabla 3.4.1 – 1 donde señala factores de carga según la combinación,

Tabla 6.- Factores de carga por combinación.

Combinación de carga	Factor de carga	
	Fuerzas accidentales	
	Sismo	Carga móvil
Resistencia I		1.75
Evento extremo I	1	

en este trabajo se considera dos combinaciones de dicha tabla.

Por lo tanto, para las cargas móviles se usa un factor de carga $y_i = 1.75$.

El factor de modificación de carga está relacionado con la ductilidad, redundancia e importancia operativa. En este trabajo se considera el factor de carga para todos los casos igual a la unidad, es decir $n_i = 1$.

Las solicitudes de carga para las cargas permanentes se consideran igual a la unidad, por lo tanto, para cargas permanente $Q_i = 1$. Para las cargas móviles se hará un incremento señalado en ASSHTO LRFD 2012 tabla 3.6.2.1 – 1 por capacidad de carga dinámica. En donde se indica un incremento para las cargas dinámicas del 33% esto es:

$$Q_i = 1 + 0.33 = 1.33$$



De esta manera obtenemos:

- Para cargas permanentes: $Q = (1) (1.25) (1) = 1.25$
- Para cargas móviles: $Q = (1) (1.75) (1.33) = 2.3275$

En esta combinación de cargas móviles se considera el efecto de dos carriles de circulación, correspondientes a vehículos HS-20 (FIGURA 38) y T3-S2-R4 (FIGURA 39).

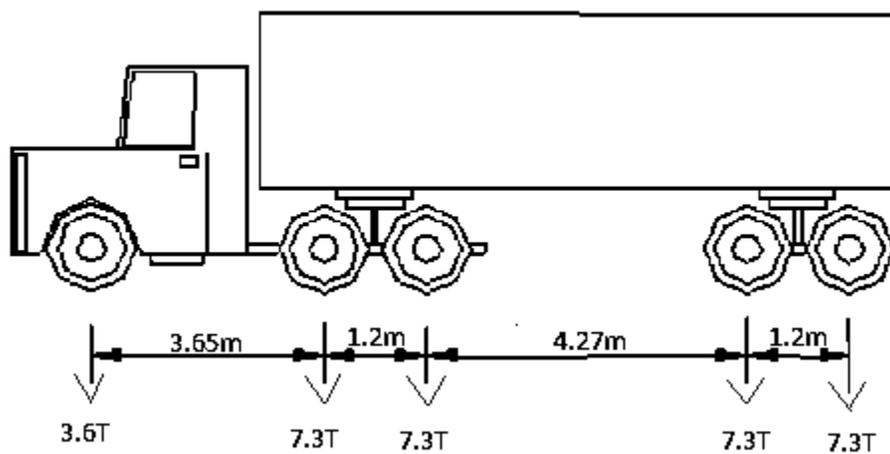


Figura 42.- HS-20 (obtenido de <http://www.construaprende.com/docs/tesis/295-conservacion-puentes-carreteros?start=6>)

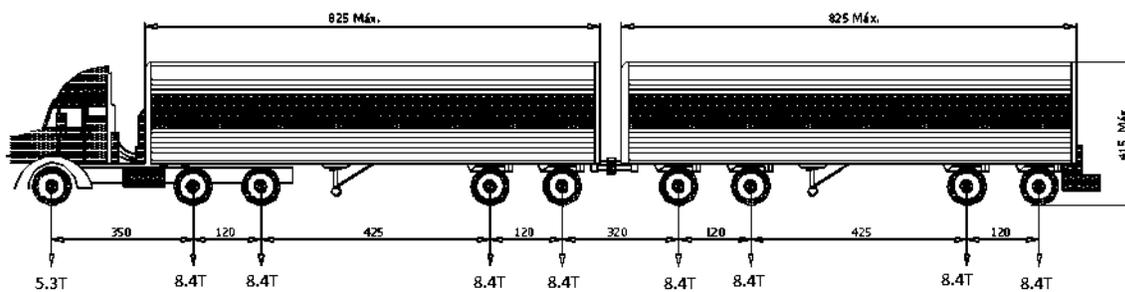


Figura 43.- T3-S2-R4 (http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_16/te_04/ar_01.pdf)

Una vez obtenidos los valores la combinación “Resistencia I” es:



Tabla 7.- Combinación Resistencia I.

Resistencia I	
Carga	Factor
Muerta elementos estructurales	1.25
Muerta pavimento	1.25
Muerta parapetos	1.25
HS-20	2.3275
T3-S2-R4	2.3275

2.3.3.- Evento extremo I.

De igual manera es una combinación considerada en el método LRFD 2012, la cual incluye también efecto producido por un terremoto. Los factores de esta combinación se obtienen de manera similar que la combinación anterior

$$Q = \sum niyiQi$$

Para el evento extremo 1, el factor carga es distinto al considerado en la combinación anterior, siendo usado $yI = 0.5$ para cargas vehiculares, y agregando el efecto de sismo con $yI = 1$ (TABLA 6).

La combinación queda:

Tabla 8.- Combinación evento extremo I

Evento extremo I	
Carga	Factor
Muerta elementos estructurales	1.25
Muerta pavimento	1.25
Muerta parapetos	1.25
HS-20	0.665
T3-S2-R4	0.665
Sismo	1



Esta combinación se crea en dos direcciones ortogonales “U1 (X)” y “U2 (Y), únicamente se cambia la dirección de aplicación las aceleraciones sísmicas. De esta manera se crean dos combinaciones: “Evento extremo en X” y “Evento extremo en Y”.

Para esta combinación fue usado el registro acelerográfico del aeropuerto de Zihuatanejo guerrero, llamado AZIH8509.211, con intensidad Mb: 6.3//Ms: 7.6//Mc: 7.5.



3.-Diseño de columnas, apoyos de neopreno y aisladores sísmicos.

Los resultados producto de las combinaciones de carga anteriores (sección 3.3), son necesarios para conocer las fuerzas actuantes sobre diferentes elementos y para realizar el diseño de las secciones de manera adecuada. En este trabajo estos resultados son usados para diseñar las columnas de concreto armado, los apoyos de neopreno y los aisladores sísmicos. Al ser elementos que forman parte de la subestructura, se encuentran permanentemente sometidos a fuerzas gravitacionales; estas fuerzas se obtienen de los análisis bajo la condición de “Carga muerta” (sección 3.3.1).

3.1.- Fuerzas en elementos.

3.1.1.- Fuerza axial (dirección U3 o Z) sobre las columnas.

En total se tienen 20 columnas, al ser un puente doblemente geométrico, se encuentran columnas que soportan las mismas cargas muertas, en este caso se presentan cuatro cargas distintas sobre las columnas según su zona de ubicación (FIGURA 40).

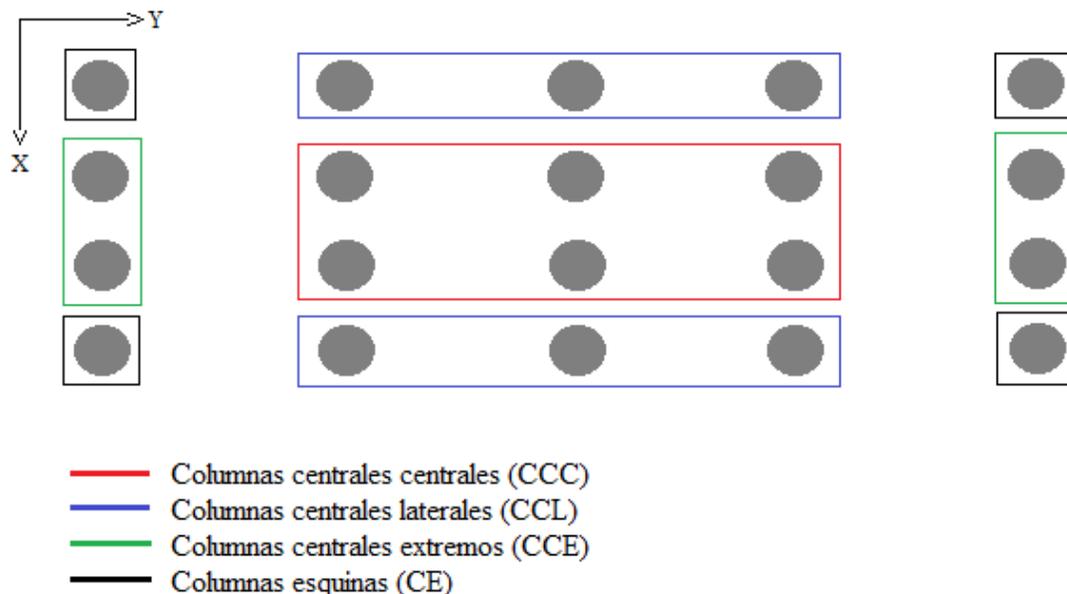


Figura 44.- Esquema de columnas que soportan la misma carga muerta.



Las cargas muertas que soportan las columnas anteriores fueron redondeadas a la tonelada superior inmediata.

Tabla 9.- Carga axial por peso muerto soportada por las columnas según

Tipo de columna	Carga axial (Ton)
Columnas centrales centrales (CCC)	-248
Columnas centrales laterales (CCL)	-132
Columnas centrales en extremos (CCE)	-136
Columnas en esquinas (CE)	-75

3.1.2.- Fuerza axial (dirección U3 o Z) sobre los aisladores sísmicos (modelo 2).

Los elementos tipo link usados para definir los aisladores sísmicos se ubican apoyados sobre los cabezales, que a su vez soportan a las traveses ASSTHO IV. Por lo tanto, en este trabajo se consideran ocho aisladores sísmicos sobre cada marco de la subestructura, dándonos un total de 40 aisladores sísmicos

La fuerza axial considerada en estos elementos es la obtenida por los cálculos del uso normal del puente, esto es el resultado de la combinación “Resistencia I” (sección 3.3.2) y por los cálculos de las cargas muertas en el puente, resultado de la combinación “Carga muerta” (sección 3.3.1).

Los aisladores sísmicos considerados serán idénticos, esto asegura un comportamiento más homogéneo resultando en una fluencia más uniforme, por lo tanto, el resultado usado para el diseño será el de mayor demanda axial obtenido por la combinación “Resistencia I”.

Los resultados de las fuerzas axiales en dichos elementos, muestran mayores demandas en los aisladores centrales, siendo la mayor carga:

$$P_{max \text{ sobre LRB}} = 2520.7kN = 257,040kgf$$

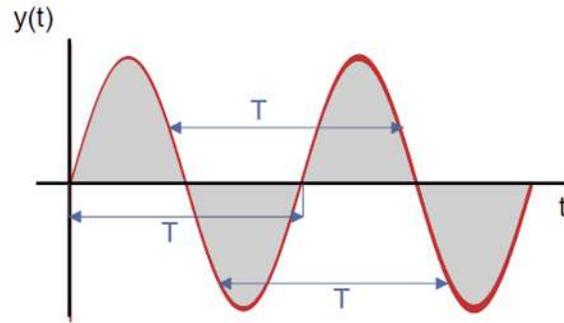
Para la verificación de estabilidad de los aisladores (LRB) se recomienda usar los resultados de la combinación “Carga muerta”.



$$P_{muerta\ sobre\ LRB} = 1,050kN = 107,036kgf$$

3.1.3.- Periodo de vibración (modelo 1).

El periodo de vibración o periodo de oscilación, es el tiempo que tarda en completarse un ciclo, en este caso el tiempo que tarda en completarse una oscilación de la estructura, en dinámica estructural son comúnmente denotados por la letra "T". Las estructuras pueden presentar diversas configuraciones laterales durante la acción sísmica, a esto



Periodo de una oscilación

Figura 45.- Periodo de ondulación. (<http://uno2y3.com/pau-comunidad-valenciana-fisica-2016-a-bii/>).

se le conoce como modos de vibrar. Por su parte la frecuencia de vibración es el valor inverso del periodo ($1/T$), lo cual indica la cantidad de ciclos completados en un segundo. Los periodos de vibración están relacionados con la rigidez del sistema, la masa y su altura.

El cortante basal más crítico se presenta con el periodo fundamental de vibrar, siendo este cuando las fuerzas inerciales tienen el mismo sentido, es decir la estructura oscila lateralmente con todas las masas moviéndose en face, debido a esto el periodo fundamental el mayor de los periodos) de las estructuras se relaciona con los desplazamientos mayores.

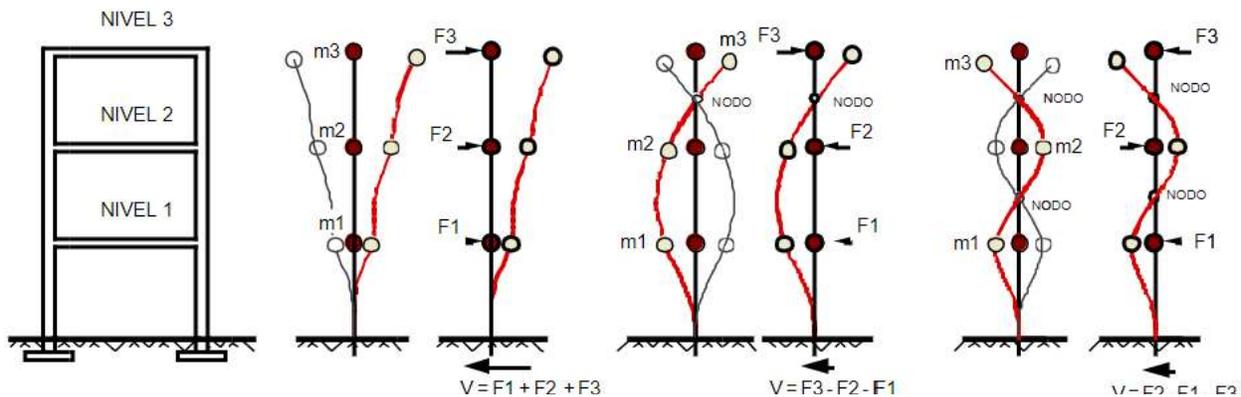


Figura 46.- modos de vibrar y periodos de vibración (<http://www.redalyc.org/html/1939/193932724001/>).



Es muy importante conocer este periodo, ya que, si se llegan a presentar un terremoto que genere vibraciones del suelo en un periodo muy similar, se presenta resonancia, lo cual amplifica la ondulación, por lo tanto, los desplazamientos y los esfuerzos en la base.

Realizando el análisis modal en la estructura, se obtuvo el modo fundamental del puente apoyado sobre los apoyos de neopreno (modelo 1. El periodo fundamental y la frecuencia son:

$$T = 1.14 \text{ segundo.}$$

$$F = 0.88 \text{ ciclo/segundo}$$

3.2- Diseño de elementos.

3.2.-Diseño de elementos.

El diseño de los elementos se realiza a partir de conocer los elementos mecánicos a los cuales estarán sometidos, buscando llegar a un diseño óptimo que soporte las fuerzas, sea funcional y cumpla con los requisitos reglamentarios. Existe una gran cantidad de normas y reglamentos para construcción, principalmente para construcción de elementos estructurales de concreto y elementos estructurales de acero, en donde se especifican con base a investigaciones las características que deben cumplir los elementos para su comportamiento adecuado.

3.2.1.- Diseño de columnas.

Las columnas son los elementos que soportan verticalmente todo el peso de la estructura, transmitiéndola al suelo. En este trabajo se consideran que las columnas están empotradas en la parte inferior. Su diseño se realiza con la sección de diseño de concreto de Sap2000 V.19.2.1, que incluye el diseño según las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Concreto, del Distrito Federal RCDF 2004.



El diseño se realizó con la norma mencionada, se ingresaron las combinaciones de carga para las cuales se requería el diseño, en este caso se ingresaron: Resistencia I, Evento extremo en dirección X y Evento extremo en dirección Y. FIGURA 42.

Design Load Combinations Selection

Figura 47.- Combinaciones para diseño de las columnas de concreto.

Los resultados del diseño con el software sap2000 nos indicó una mayor demanda en la combinación “Evento extremo en Y”, donde la columna con más requerimiento de acero longitudinal señala 445.07 cm^2 . Las NTC 2004, indican que la cuantía de acero de refuerzo longitudinal no será inferior a $20/f_y$ ni mayor a 0.06. El acero transversal, debe cumplir tres criterios, no debe ser mayor que:

- i.- $850/\sqrt{f_y}$ veces el diámetro de las barras de refuerzo longitudinal.
- ii.- 48 diámetros de las barras de refuerzo transversal.
- iii.- La mitad de la menor dimensión de la columna

En las especificaciones ASSTHO 2012, en el comentario 5.10.11.4.1a se indica que el área de acero de refuerzo no será menor que el 1% ni mayor al 6% del área gruesa.

Por lo tanto, las especificaciones a cumplir de acero de refuerzo son las mostradas en la TABLA 10.



Tabla 10.- Especificaciones de acero longitudinal y transversal.

Cuantía de acero de refuerzo longitudinal y separación máxima de acero transversal.		
	Mín.	Máx.
ASSTHO 2012 acero longitudinal	0.01	0.06
NTC 2012 acero longitudinal	(20/fy)%	0.06
NTC 2012 acero transversal i		(850/√fy)*Diámetro de acero longitudinal
NTC 2012 acero transversal ii		48*Diámetro de acero transversal
NTC 2012 acero transversal iii		La mitad de menor dimensión de columna

Considerando el diseño de acero de refuerzo longitudinal en sap2000 (445.07 cm²), y ya que se realizará el mismo diseño para todas las columnas, se propone 29 varillas de acero longitudinal del No 14 (29#14), lo cual representa un porcentaje de acero del 3.85% que es igual a 450.02cm². Para el acero transversal se consideran varillas del No 5 a cada 0.15 metros de separación (#5@0.15).

Se verifica que este diseño cumpla con las especificaciones (TABLA 11)

Tabla 11.- Verificación de cumplimiento de especificaciones.

Cuantía de acero de refuerzo longitudinal (porcentaje de área gruesa) y separación máxima de acero transversal (cm).	Diseño de columnas (% , cm)		Por lo tanto	
	Mín.	Máx.		
ASSTHO 2012 acero longitudinal	0.01	0.06	0.0385	CUMPLE
NTC 2012 acero longitudinal	0.0048	0.06	0.0385	CUMPLE
NTC 2012 acero transversal i		58.30	15	CUMPLE
NTC 2012 acero transversal ii		213.36	15	CUMPLE
NTC 2012 acero transversal iii		60	15	CUMPLE

Al verificar que cumple, se opta por mantener el diseño propuesto:



Columna circular de concreto $f'c= 300\text{kg/cm}^2$, diámetro de 1.2 metros, acero longitudinal 29#14, acero transversal #5@0.15 .

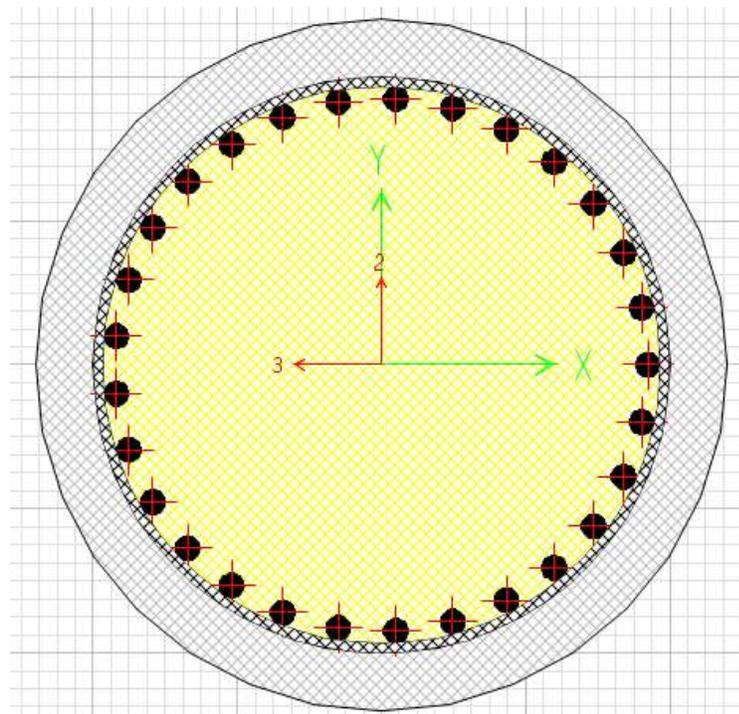


Figura 48.-Sección transversal de la columna.

3.2.2.- Diseño de apoyos de neopreno fijos y móviles.

Son elementos creados de capas intercalas de acero A-36 y caucho de dureza 60° shore “A”. Son fabricados con un proceso de vulcanización y agregado de químicos para lograr una buena adhesión. Estos elementos agregan flexibilidad al puente debido a sus láminas de caucho, su gran resistencia a compresión está dada por las láminas de acero. Generalmente son de superficie cuadrada, aunque también pueden producirse redondos. Las características que deben tener estos apoyos para los puentes en territorio mexicano están establecidas por la SCT en N·CMT·2·08/04, CMT. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARTE: 2. MATERIALES PARA ESTRUCTURAS, 08. Placas y Apoyos Integrales de Neopreno.

Los espesores estándar que se pueden encontrar en catálogos de fabricantes son:

Apoyos fijos:

2.5cm con 2 láminas de Acero intermedias.

4.1cm con 3 láminas de Acero Intermedias.

Apoyos móviles:



5.7cm con 4 láminas de Acero intermedias.

7.3cm con 5 láminas de Acero Intermedias.



La rigidez de los apoyos está en función de su altura, entre mayor altura menor su rigidez.

Las capas que los componen tienen los siguientes espesores:

Espesor de capa de caucho intermedia (e_c) = 0.013m.

Espesor de capa de acero (e_a) = 0.003m.

Espesor de capa de caucho de recubrimiento (e_r) = 0.003m.

En este trabajo se usan apoyos de neopreno fijos de 4.1cm de espesor, y apoyos móviles de 5.7cm de espesor, ambos con superficie cuadrada de ($a = 0.3m$) x ($b = 0.3m$) dándonos $A = 0.09m^2$.

El módulo de cortante (G) = 1MPa = 101,971.6 kgf/m²

Módulo de compresibilidad (k) = 16.86 MPa = 1,719,241.5 kgf/m².

El apoyo fijo está compuesto de 3 capas de acero, dos capas intermedias

de caucho y dos capas de recubrimiento de caucho FIGURA 44. Esto da un espesor efectivo de caucho $h_{ef} = 0.032m$.

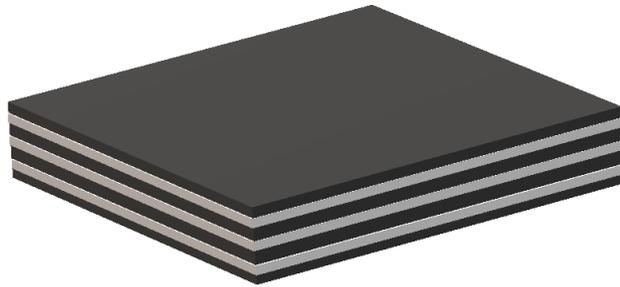


Figura 49.- Apoyo de neopreno fijo.

Para el cálculo de la rigidez horizontal y vertical, se usan las siguientes ecuaciones:

- Rigidez horizontal:

$$Kh = \frac{GA}{h_{ef}}$$

Sustituyendo tenemos:

$$Kh = \frac{(101,971.6 \frac{kgf}{m^2}) * (0.09m^2)}{0.032m}$$



$$Kh = 286,795.125 \frac{kgf}{m}$$

- Rigidez vertical:

$$Kv = \frac{6GS^2Ak}{(6GS^2+k)hef}$$

Donde S:

$$S = \frac{ab}{2e_n(a+b)}$$

Sustituyendo tenemos:

$$S = \frac{(0.3m)(0.3m)}{2(0.013m)(0.6m)} = 5.77$$

Sustituyendo en la rigidez vertical tenemos:

$$Kv = \frac{6(101,971.6 \frac{kgf}{m^2})(5.77)^2(0.09m^2)(1,719,241.5 \frac{kgf}{m^2})}{\left(6 \left(101,971.6 \frac{kgf}{m^2}\right) (5.77)^2 + \left(1,719,241.5 \frac{kgf}{m^2}\right)\right) * (0.032m)}$$

$$Kv = 4,459,015.156 \frac{kgf}{m}$$

Se realiza el mismo procedimiento para el cálculo de rigideces del aislador móvil, este apoyo se considera de una altura $h = 0.057m$. Por lo tanto, lleva intercalada una lámina extra de acero y una lámina extra de caucho intermedio, lo que nos indica una altura de caucho efectiva:

$$hef = 0.045m.$$

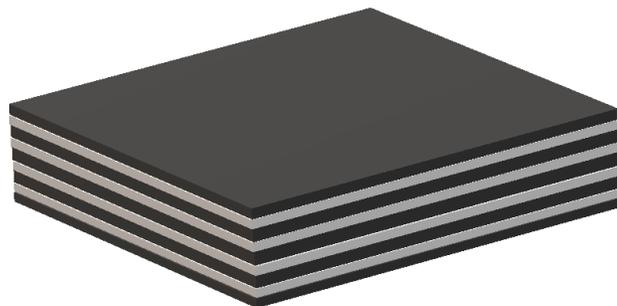


Figura 50.- Apoyo de neopreno móvil.

Sustituyendo hef en las ecuaciones Kh y Kv, nos queda:



- Rigidez Horizontal.

$$K_h = \frac{\left(101,971.6 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right) * (0.09\text{m}^2)}{0.045\text{m}}$$

$$K_h = 203,835.200 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

- Rigidez vertical:

$$K_v = \frac{6(101,971.6 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2})(5.77)^2(0.09\text{m}^2)(1,719,241.5 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2})}{\left(6\left(101,971.6 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)(5.77)^2 + \left(1,719,241.5 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}\right)\right) * (0.045\text{m})}$$

$$K_v = 3,170,855.222 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

∴ Por lo tanto, las rigideces son:

Tabla 12.-Rigideces de los apoyos.

Tipo de apoyo	Rigidez horizontal (Kh) (kgf/m)	Rigidez vertical (Kv) (kgf/m)
Fijo	286,795.13	4,459,015.156
Móvil	203,835.20	3,170,855.22

3.2.3.- Diseño de aisladores sísmicos.

Los aisladores sísmicos de la misma manera que los apoyos de neopreno están compuestos de capas intercaladas de caucho y acero, compuestas en su centro por un núcleo de plomo que brinda disipación de energía al desplazarse lateralmente, y dos placas de anclaje en sus dos extremos para unir de manera adecuada a la superestructura con la subestructura.

Los aisladores sísmicos se agregan generalmente en la base de la estructura buscando un mejor desempeño de la misma ante la acción de un terremoto, estos aisladores reducen la



rigidez y agregan amortiguamiento. En el caso de los puentes son agregados sobre la subestructura, soportando la superestructura.

En este trabajo se usan aisladores sísmicos con núcleo de plomo (LRB), estos aisladores están formados de manera similar a los apoyos de neopreno, con capas intercaladas de acero y caucho, pero en mayor cantidad, además de contener un núcleo de plomo que brinda rigidez y amortiguamiento, siendo capaz de deformarse en continuas ocasiones sin degradar su resistencia. También cuenta con dos placas externas para una correcta adhesión entre los dos elementos estructurales al colocarse. En este trabajo se consideran aisladores sísmicos circulares. FIGURA 47 - 48

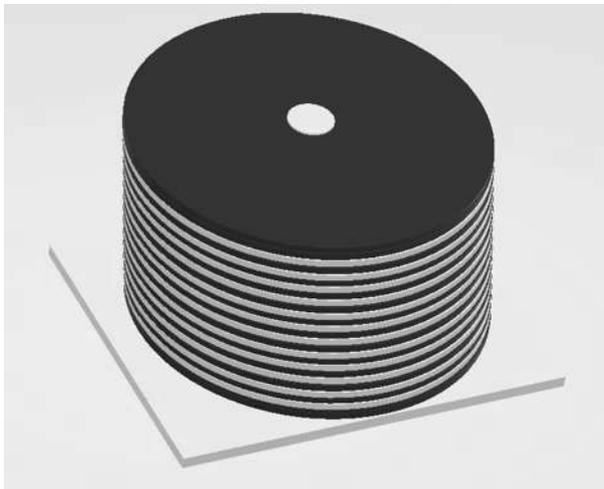


Figura 52.- Aislador (LRB) sin placa superior de agarre.

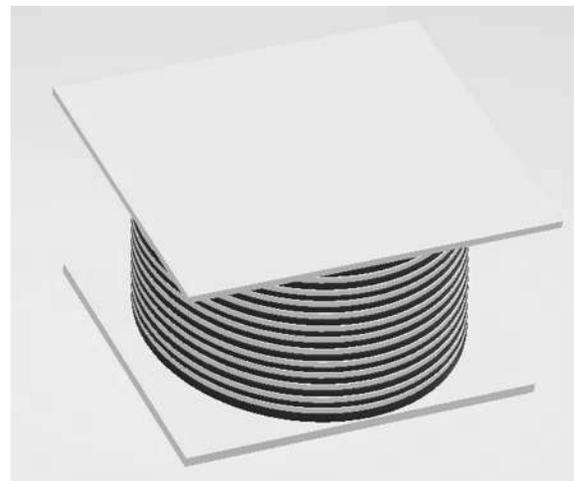


Figura 51.- Aislador (LRB) con ambas placas de agarre.

Los aisladores sísmicos, de igual manera que los apoyos de neopreno se colocan directamente debajo de las trabes, sin embargo, en el modelo con aisladores sísmicos (modelo 2) se considera que elimina la junta de dilatación para así lograr un movimiento más homogéneo de la superestructura, ya que al ser la separación entre vigas muy pequeña (en este trabajo considerada de 4cm en el modelo 1), y al ser altamente deformables los aisladores sísmicos (modelo 2), se pueden presentar problemas de impacto entre las vigas. Debido a esto al agregar los aisladores sísmicos se elimina la separación entre las losas y vigas. FIGURAS 49 - 50



Apoyos de neopreno (Modelo 1)

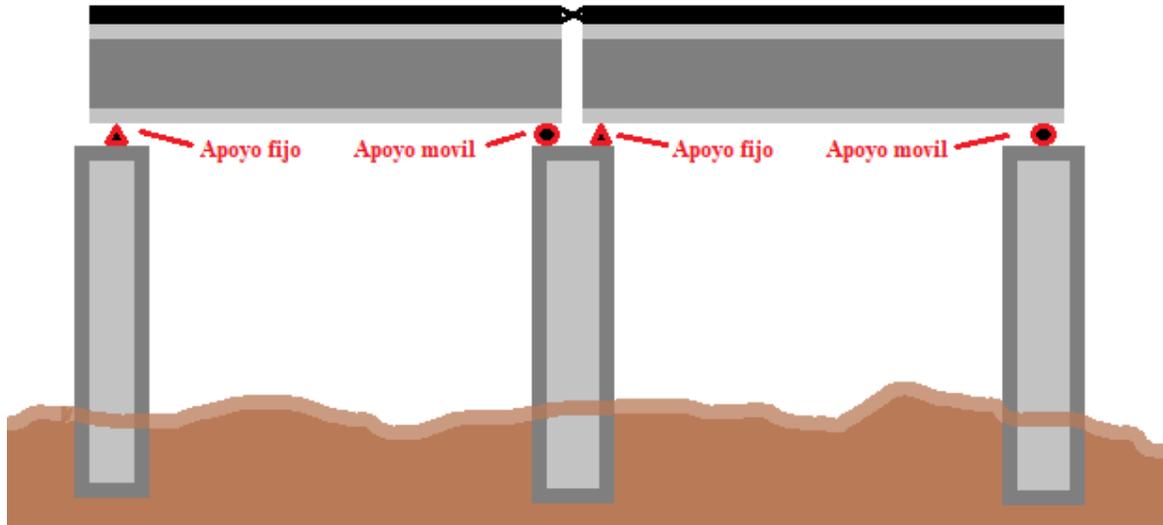


Figura 53.- Esquema de apoyos de neopreno y separación en traves.

Aisladores sísmicos con nucleo de plomo (Modelo 2)

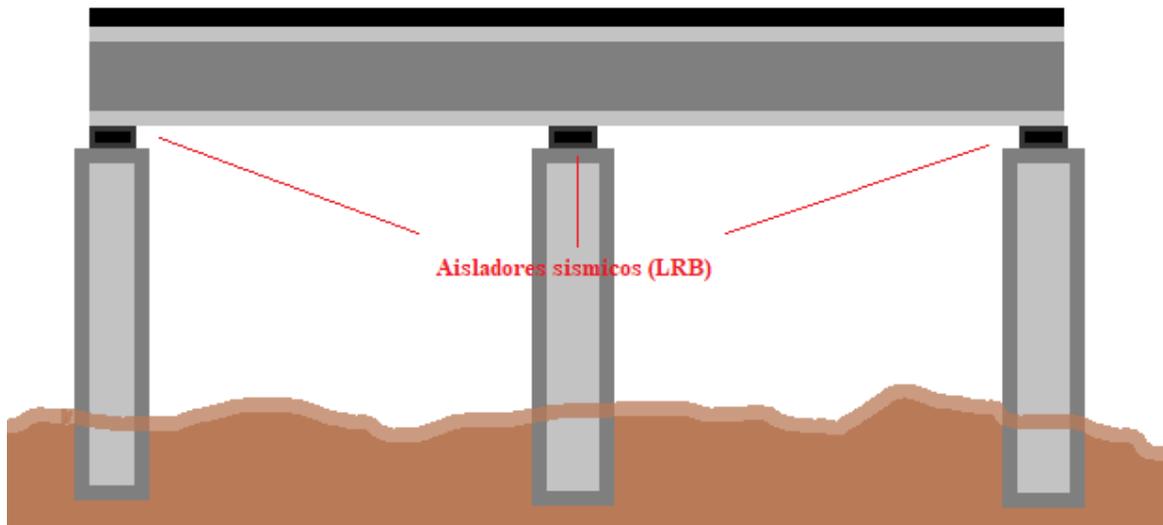


Figura 54.- Esquema de aisladores sísmicos, sin separación en traves.



Para el diseño de los aisladores se toma en consideración las recomendaciones de diseño del fabricante, así como los valores que indican en los catálogos, algunas recomendaciones con base al comportamiento presentado en pruebas del laboratorio. En este trabajo se consideran apoyos fabricados por la empresa “DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS”.

Para el cálculo de los aisladores de neopreno con núcleo de plomo el procedimiento de diseño es el siguiente:

Se realiza el diseño con base a dos criterios: Desplazamiento máximo probable y carga axial máxima. Se realiza de las dos maneras considerando el diseño de mayor resistencia.

Para iniciar el dimensionamiento de aisladores se considera un sismo máximo, con recomendación del fabricante del 60% de la aceleración gravitacional, esto es:

$$SM = 0.6g$$

Siendo:

$$- g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Obtenemos:

$$SM = 5.886 \text{ m/s}^2$$

Se propone tomar como consideración inicial un periodo fundamental igual a 2.5 s, o si es que se conoce el periodo de la estructura sin amortiguar se propone triplicar ese periodo, en este trabajo es conocido el periodo de la estructura sin amortiguar (modelo 1) (sección 4.1.3), por lo tanto, se triplica ese periodo $T = 1.14$ segundo.

Dándonos:

$$TM = 3.43s.$$

Se considera un amortiguamiento efectivo del 15% por lo tanto:

$$\beta_M = 15$$



Se procede a calcular el desplazamiento máximo lateral:



$$dm = \frac{g * SM * TM}{BM * 4\pi^2}$$

Donde:

- g = aceleración gravitacional
- SM = sismo máximo
- TM = periodo máximo
- BM = amortiguamiento máximo

Sustituyendo:

$$dm = \frac{9.81m/s^2 * 5.886 m/s^2 * 3.42816 sg}{15 * 4\pi^2}$$

Obtenemos:

$$dm = 0.33m.$$

Con este desplazamiento se calcula el desplazamiento máximo adicional por excentricidad

$$dma = dm(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2})$$

Donde:

- y = Distancia entre el centroide del sistema de aisladores y el aislador más alejado medido en la distancia longitudinal de la estructura.
- b = Dimensión corta en planta de la estructura.
- d = Dimensión larga en planta de la estructura.
- e = Excentricidad actual más excentricidad accidentada.

Nota: Si la excentricidad es igual a cero por ser una estructura simétrica, la excentricidad del sistema debe considerarse como mínima siendo igual al cinco por ciento de la dimensión más



corta en planta de la estructura. Como en este trabajo el puente es doblemente simétrico se considera:

Sistema de aisladores

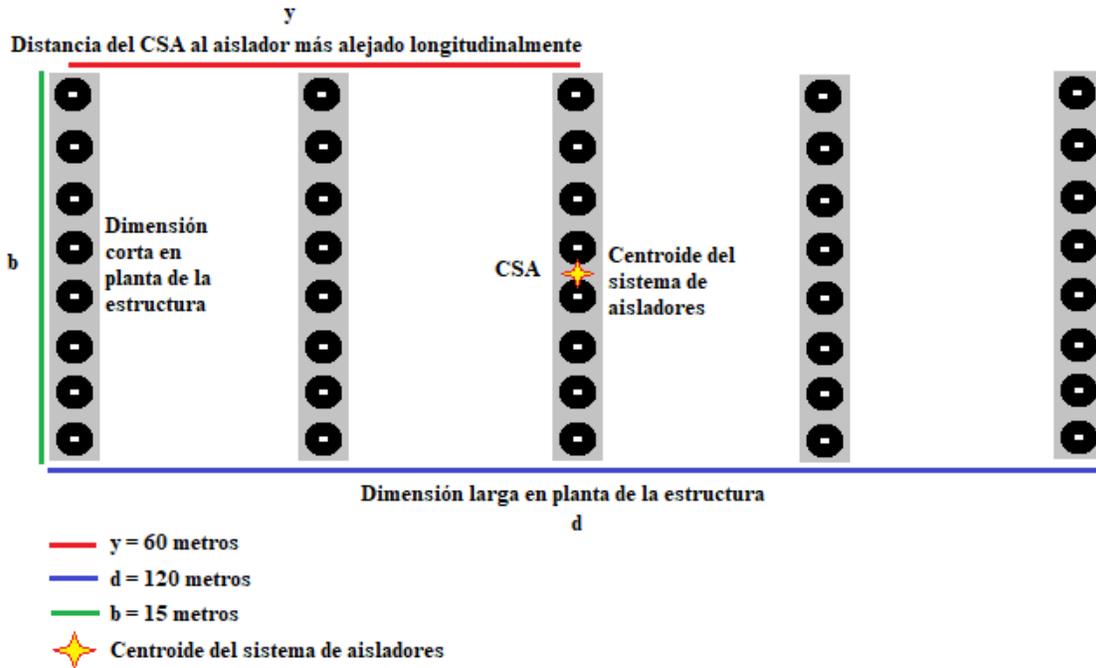


Figura 55.- Esquema del sistema de aisladores sísmicos.

$$e = 0.05 * b$$

En la FIGURA 53 se observar un esquema del sistema de aisladores sísmicos visto en planta, donde obtenemos los valores necesarios para el cálculo del desplazamiento máximo adicional por excentricidad.

Sustituyendo obtenemos:

$$d_{ma} = 0.33m \left(1 + 60m \frac{12(0.05 * 15m)}{(15m)^2 + (120)^2} \right)$$

$$d_{ma} = 0.35m$$



Con este valor calculamos el diámetro del aislador siendo:

$$D = 1.5 * DMA$$

Sustituyendo obtenemos:

$$D = 0.52m$$

Para realizar el diseño por carga axial última, se considera la carga más alta presentada en los aisladores, como se muestra en la sección 4.1.2. La carga axial última es:

$$P = 257,040kgf$$

Ya que se conoce la carga, se calcula el área necesaria del aislador para así obtener su diámetro. Para esto se debe dividir dicha carga axial última entre el esfuerzo axial permisible, el cual es señalado por el fabricante como 8MPa (815,773kgf/m²), posteriormente se calcula el diámetro de esa área:

$$A = P/EP$$

Siendo:

- P = Carga axial última.
- EP = Esfuerzo axial permisible

Sustituyendo tenemos:

$$A = \frac{257,040 \text{ kgf}}{815,773 \text{ kgf/m}^2} = 0.32m^2$$

Al ser una circunferencia, su diámetro nos queda:





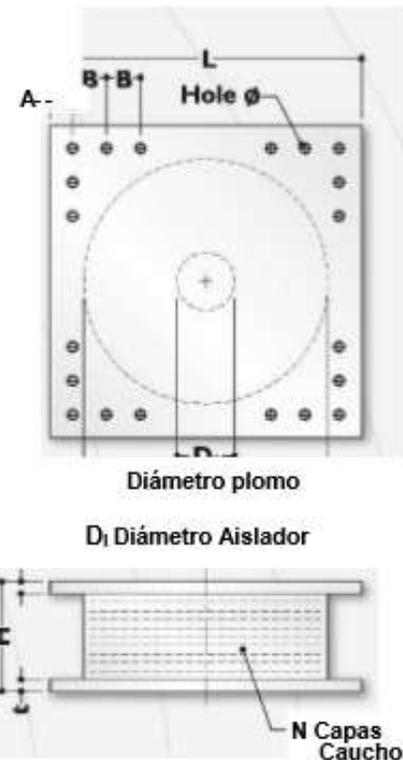
$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} = 0.63m$$

De esta manera obtenemos dos diámetros (TABLA 14):

Tabla 13.-Diámetros del aislador.

Cálculo de diseño	Diámetro
Desplazamiento máximo	0.5199m
Carga axial última	0.6334m

Diámetro Aislador, Di (mm)	PROPIEDADES DE DISEÑO			Desplazamiento Máximo, Dmax(mm)	Capacidad Carga Axial Pmax(kN)
	Rigidez Producida, Kd(kN/mm)	Resistencia Características Qd(kN)	Rigidez a la compresión, Kv(kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000



El diseño del diámetro por carga axial nos indica cual es el diámetro suficiente para soportar esa carga, sin embargo, no quiere decir que sea el adecuado, sino el mínimo necesario para soportar esa carga, por lo tanto, el diámetro debe ser mayor, considerando el sucesor inmediato encontrado en el catálogo de aisladores del fabricante, en este caso el catálogo de la empresa “DYNAMIC ISOLATION SYSTEMS” (TABLA 15).



En esta tabla se observa que existe un modelo con un diámetro de 650mm = 0.65m, que es adecuado para nuestro diseño, ya que como se indica, soporta una carga de hasta 2,700kN (275,323.4kgf).

Tabla 14.-Propiedades técnicas de los aisladores (obtenida de:<http://www.dis-inc.com/index.html>)

Propiedades del aislador: Unidades métricas

TAMAÑO DEL DISPOSITIVO				DIMENSIONES DE LA PLACA DE SOPORTE					
Diámetro Aislador, D _i (mm)	Altura Aislador, H (mm)	Número de capas de caucho, N	Diámetro del plomo, D _L (mm)	L (mm)	t (mm)	Cantidad Orificios	Orificio ø (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

(1) Las capacidades de carga axial corresponden a los máximos desplazamientos basados en los límites de diseño del 250% de tensión de corte del de caucho o 2/3 del diámetro del aislador. El desplazamiento real de un aislador y la capacidad de carga dependen del módulo y número de capas de caucho.

(2) Los Módulos de Corte del Caucho (G) están disponibles desde 0.38 N/mm² hasta 0.70 N/mm².

(3) Para el modelado analítico bilineal de la rigidez elástica, utilice $K_{e1}=10*K_d$.

Por lo tanto:

$$D = 0.65m.$$

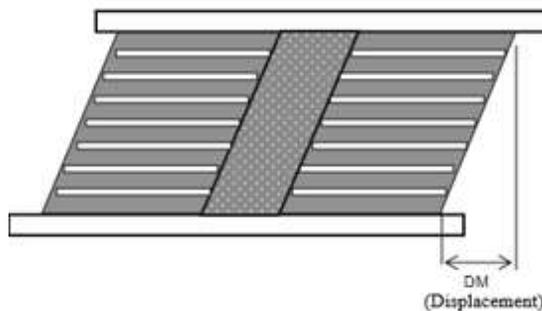


Figura 56.- Desplazamiento del aislador (LRB).

En la TABLA 16 se muestran algunas propiedades técnicas de los distintos modelos de aisladores sísmicos.

Una vez obtenido el diámetro de diseño, se verifica el nuevo desplazamiento máximo señalado para ese diámetro.



$$dm = 0.41m$$

Se procede al cálculo de la fuerza de histéresis Q_d , para el cual se recomienda una relación Q_d/W entre el 3% y 10%, se propone una medida media entre esos porcentajes, considerando 6.5% por lo tanto:

$$\frac{Q_d}{W} = 0.065$$

Donde:

- Q_d = Fuerza de histéresis
- $W = P$ = Carga axial sobre el aislador = 257,040 kgf

Despejando Q_d :

$$Q_d = 257,040kgf * 0.065$$

$$Q_d = 16,707.6kgf = 163.8455kN$$

Se calcula la fuerza de fluencia.

$$F_y = 1.1 * Q_d$$

Sustituyendo.

$$F_y = 1.1 * (16,707.6kgf)$$

$$F_y = 18,378.36$$

Se calcula el diámetro del núcleo de plomo:

$$A_{plomo} = F_y / \sigma_y$$

Donde:

- σ_y = Resistencia de goma no confinada = 10MPa = 10,000 kN/m²

Por lo tanto:



$$D_p = \sqrt{\frac{A * 1.1Qd}{\pi * \sigma_y}}$$

Sustituyendo:

$$D_p = \sqrt{\frac{A * 1.1 * (163.8455kN)}{\pi * \left(\frac{10,000kN}{m^2}\right)}}$$

$$D_p = 0.1514m \cong 0.15m$$

El cálculo de la altura del aislador sísmico sin planchas de acero de refuerzo se determina a partir de la deformación de corte, cuyo límite debe ser de 250% y el máximo desplazamiento total.

$$H_{c1} = \frac{DM}{2.5}$$

Sustituyendo:

$$H_{c1} = \frac{0.41m}{2.5} = 0.164m$$

Se realiza el diseño de las capas de caucho del aislador.

Se calcula el factor de forma de las láminas de caucho (S), el factor de forma es una relación de las dimensiones de las láminas de caucho, este nos ayuda a verificar si las dimensiones de las láminas brindarán un aislamiento efectivo.

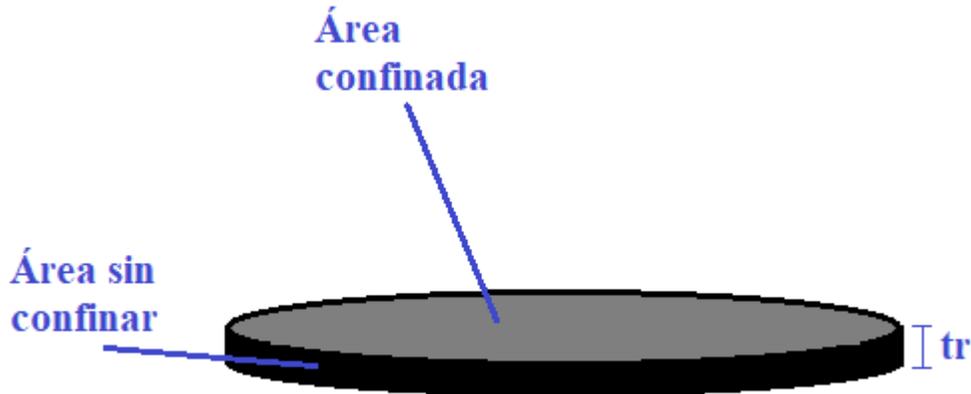


Figura 57.- Esquema de lámina de caucho

Al ser altamente deformable el caucho, para un cálculo más preciso, se considera que la longitud tr aumenta al ser sometida la lámina a compresión, ya que esta deja de ser una recta y se transforma en una parábola, de esta manera se calcula el factor de forma considerando las frecuencias de vibrar de la lámina. El factor de forma tiene una relación directamente proporcional con la relación de frecuencia de vibrar en la dirección vertical y la frecuencia horizontal. Las secciones que cumplen con una relación entre frecuencias igual o mayor a 20, han demostrado tener una gran efectividad de aislamiento esto es:

$$\frac{fv}{fh} \geq 20$$

Donde:

- fv = frecuencia oscilación vertical
- fh = frecuencia de oscilación horizontal

Para aisladores sísmicos de sección circular, esta relación de frecuencias se puede expresar como el factor de forma multiplicado por la raíz cuadrada de seis, esto es:

$$\frac{fv}{fh} = \sqrt{6} * S$$

Sustituyendo en la ecuación anterior:



$$\sqrt{6} * S \geq 20$$

Esta expresión es aplicable en cuanto el factor S se encuentra en el intervalo de:

$$5 \leq S \leq 10$$

El factor de forma es:

$$S = \frac{D}{4 * tr}$$

Donde:

- D = diámetro de aislador
- tr = espesor de capa de caucho

De tal forma, se obtiene el espesor adecuado de dos maneras:

- Proponer un valor a S dentro del intervalo y despejar tr para obtener su valor.
- Proponer un valor para tr y verificar que el factor S se encuentre dentro del intervalo

En este trabajo se propone un valor para S = 8, siendo ocho un valor medio del intervalo..

$$S = 8$$

Despejando tr:

$$tr = \frac{0.65m}{4 * 8}$$

$$tr = 0.0203m$$

Una vez definido el factor de forma, se verifica que la relación de frecuencias cumpla con el criterio que garantiza un buen comportamiento de aislamiento, esto es:

$$\sqrt{6} * (8) = 19.6$$

Es un valor muy cercano a 20, por lo cual se considera aceptable.



Se calcula la cantidad de láminas de caucho:



$$No\ de\ láminas\ de\ caucho = \frac{H_c}{tr}$$

Sustituyendo:

$$No\ de\ láminas\ de\ caucho = \frac{0.164m}{0.0203m} = 8.079$$

Se redondea a número entero:

$$No\ de\ láminas\ de\ caucho = 8$$

Por lo tanto, la altura real del neopreno es:

$$H_c = 0.16m$$

La cantidad de láminas de acero es una menor a la cantidad de láminas de caucho, siendo

$$No\ de\ láminas\ de\ acero = 7$$

Las láminas de acero se consideran de un espesor comercial de $\frac{1}{4}$ ", por lo tanto, el espesor de láminas de acero nos queda:

$$ta = 0.00635m$$

También se incluyen una plancha de anclaje en cada extremo del aislador con un espesor de 1", esto es:

$$tpa = 0.0254m$$

Esto nos da una altura total del aislador sísmico:

$$H = 8 * (0.0203m) + 7 * (0.00635m) + 2 * (0.0254m)$$

$$H = 0.26m$$



La altura del caucho es necesaria para determinar la rigidez elástica (K_e) y la rigidez postfluencia (K_d).

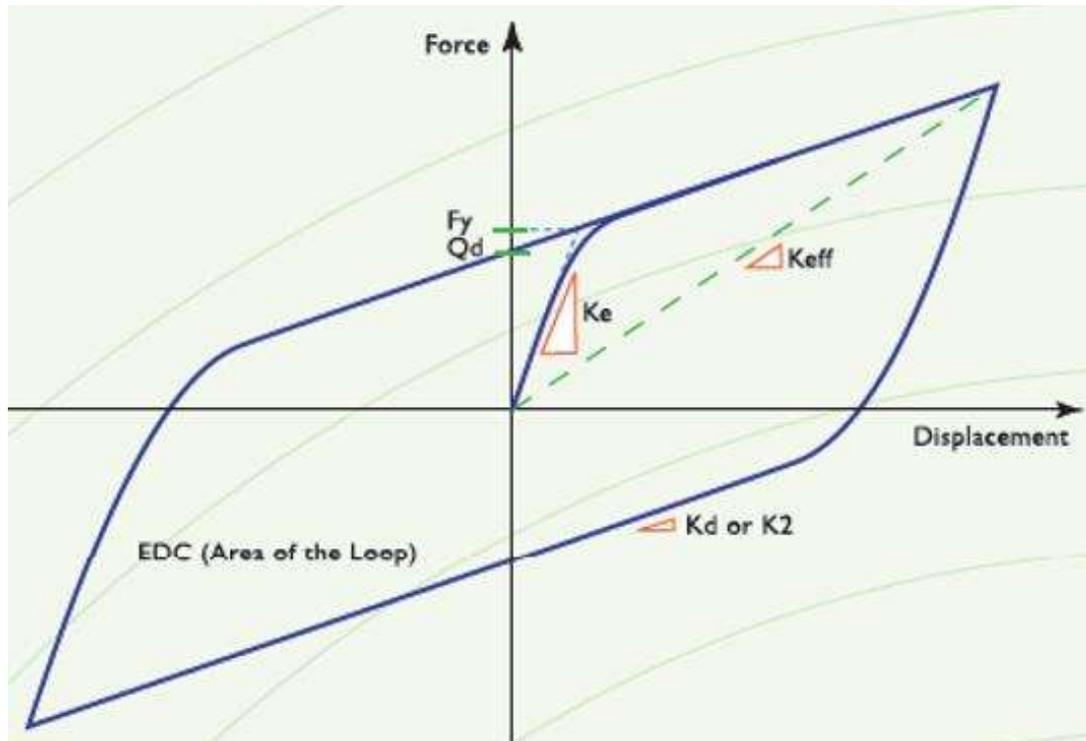


Figura 58.- Lazo histérico.

El lazo histérico de la [FIGURA 54](#), es un gráfico fuerza-desplazamiento que muestra el comportamiento de un aislador al ser sometido a fuerzas cortantes. Por lo cual para el diseño del comportamiento de dichos aisladores es necesario modelar las rigideces que lo conforman.

La rigidez K_d , depende principalmente del caucho, su altura, área y módulo de corte.

$$K_d = \frac{A_c * G}{H_c}$$

Donde:

- A_c = Área del caucho
- G = Módulo de corte del caucho
- H_c = Altura del caucho.



Para obtener A_c se calcula el área del dissipador menos el área del núcleo de plomo.



$$A_c = \frac{\pi * (D^2 - D_p^2)}{4}$$

Sustituyendo

$$A_c = \frac{\pi * (0.65^2 - 0.15^2)}{4}$$

$$A_c = 0.31m^2$$

El módulo de corte G , el fabricante nos indica en el comentario (2) TABLA 16, se encuentra disponible desde $0.38N/mm^2$ a $0.7N/mm^2$. En este caso se considera el más alto, siendo $0.7N/mm^2$ ($71,380 \text{ kgf}/m^2$).

Por lo tanto, la rigidez K_d es:

$$K_d = \frac{0.31416m^2 * 71,380 \frac{kgf}{m^2}}{0.1624m}$$

$$K_d = 138,083 \frac{kgf}{m}$$

Como se menciona en el comentario (3) TABLA 16 la rigidez elástica (k_e) es considerada como diez veces mayor que la rigidez postfluencia, esto es:

$$K_e = 10 * k_e$$

Por lo tanto:

$$K_e = 1,380,833 \frac{kgf}{m}$$

Se calcula la rigidez efectiva K_{eff} :



$$K_{eff} = \frac{Q_d}{D_M} + K_d$$

Donde:

- Q_d = Fuerza de histéresis
- D_M = Desplazamiento máximo del aislador
- K_d = rigidez postfluencia

Sustituyendo:

$$K_{eff} = \frac{16,707.6 \text{ kgf}}{0.41 \text{ m}} + 138,083 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$K_{eff} = 178,833 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Una vez que obtenemos la rigidez efectiva se calcula el desplazamiento de fluencia (D_y).

$$D_y = \frac{Q_d}{K_e - K_d}$$

Donde:

- Q_d = Fuerza de histéresis
- K_e = Rigidez elástica
- K_d = Rigidez postfluencia

Sustituyendo

$$D_y = \frac{16,707.6 \text{ kgf}}{1,380,833 \frac{\text{kgf}}{\text{m}} - 138,083 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}}$$



$$Dy = 0.01344m$$

El lazo histerético mostrado en la FIGURA 54 es el comportamiento presentado en un ciclo de deformaciones del aislador. El área del lazo es la cantidad de energía disipada por ciclo, por lo tanto, con esta se puede obtener su amortiguamiento efectivo (β_{eff}).

Energía disipada por ciclo (EDC) o área lazo histerético.

$$EDC = 4Qd * (DM - Dy)$$

Sustituyendo:

$$EDC = 4(16,707.6kgf) * (0.41m - 0.01344m)$$

$$EDC = 26,502kgf * m$$

El amortiguamiento efectivo (β_{eff}) es,

$$\beta_{EFF} = \frac{EDC}{2\pi * K_{eff} * DM^2}$$

Sustituyendo:

$$\beta_{EFF} = \frac{26,502kgf * m}{2\pi * 178,833 \frac{kgf}{m} * (0.41m)^2}$$

$$\beta_{EFF} = 0.1403$$

Por lo tanto, se tiene un amortiguamiento efectivo del 14.03%

3.2.3.1.- Verificaciones del diseño del aislador (LRB).

Las verificaciones diseño son necesarias para corroborar que la estabilidad del aislador presente un buen comportamiento.



Para verificar la estabilidad, es necesario el cálculo de la rigidez vertical (K_v), para esto, se calcula el módulo de compresión.

$$E_c = 6 * G * S^2$$

Sustituyendo:

$$E_c = 6 * (71,380.1 \text{ kgf/m}^2) * (8)^2$$

$$E_c = 27,409,958.4 \text{ kgf/m}^2$$

Con este valor se calcula la rigidez vertical,

$$K_v = \frac{E_c * A}{H_c}$$

Sustituyendo,

$$K_v = \frac{(27,409,958.4 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^2}) * (0.331831 \text{m}^2)}{0.1624 \text{m}}$$

$$K_v = 56,006,604 \text{ kgf/m}$$

Se calcula la resistencia a la compresión, dada por las siguientes expresiones.

- Para factor de forma $S \leq 15$

$$\gamma_c = \frac{3S * P_p}{2 * A_r * G(1 + 2 * k * S^2)}$$

- Para factor de forma $S > 15$



$$\gamma_c = \frac{3 * Pp(1 + 8G * k * \frac{S^2}{K})}{4G * k * S * Ar}$$

En este caso $S = 8$, por lo tanto, se usará la expresión para $S \leq 15$

Donde:

- Pp = Carga axial permanente sobre los aisladores (LRB) = 157,036 kgf.
- G = Módulo de corte del caucho.
- k = Constante del material. (para $G = 0.7 \text{ N/mm}^2$, usado en este trabajo se consideró $k = 0.7$).
- S = Factor de forma = 8
- Ar = Área superpuesta al momento del máximo desplazamiento (FIGURA 55).

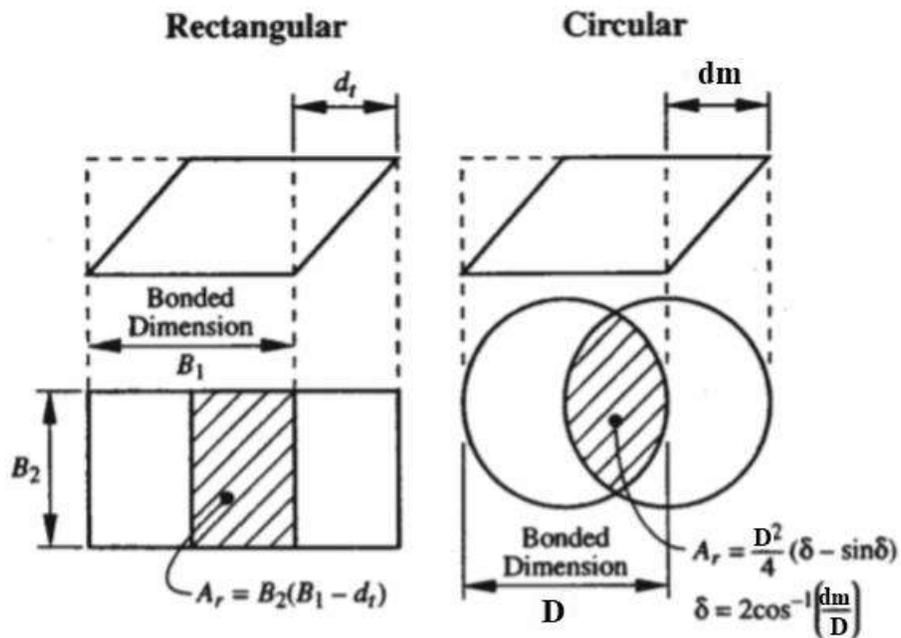


Figura 59.-Área superpuesta del aislador (LRB) en el desplazamiento máximo.

Se calcula el área superpuesta con las ecuaciones de la FIGURA 55 (expresadas en radianes).

$$Ar = \frac{D^2}{4} (\delta - \sin\delta)$$



Donde:

$$\delta = 2\cos^{-1}\left(\frac{dm}{D}\right) = 1.7765$$

Sustituyendo para obtener el área traspuesta:

$$Ar = \frac{0.65^2}{4}(1.7765 - \sin 1.7765)$$

$$Ar = 0.084245m^2$$

Se procede a calcular la resistencia a compresión.

Sustituyendo:

$$\gamma_c = \frac{3 * (8) * (107,036kgf)}{2 * (0.084245m^2) * \left(71,380.1 \frac{kgf}{m^2}\right) * (1 + 2 * (0.7) * (8)^2)}$$

$$\gamma_c = 2.358$$

$\gamma_c < 2.5$ Por lo tanto, **cumple**.

Se calcula la resistencia a cortante por desplazamiento lateral producido por sismo ($\gamma_{s,eq}$).

$$\gamma_{s,eq} = \frac{dm}{Hc}$$

Sustituyendo:

$$\gamma_{s,eq} = \frac{0.41m}{0.1624m}$$

$$\gamma_{s,eq} = 2.52$$

Se calcula la fuerza cortante γ_r dada por la rotación de diseño.





$$\gamma_r = \frac{D^2 \theta}{2 * tr * Hc}$$

En este trabajo no se considera diseño rotacional, por lo tanto $\theta = 0$, lo cual no arroja:

$$\gamma_r = 0$$

Se verifican los valores, donde debe cumplirse que:

$$\gamma_c + \gamma_{s,eq} + 0.5\gamma_r \leq 5.5$$

Sustituyendo:

$$2.358 + 2.52 + 0.5(0) = 4.878 < 5.5$$

Por lo tanto, **cumple**.

Al aplicarse la carga vertical sobre el aislador, puede existir inestabilidad produciendo que el aislador falle por pandeo. Para evitar esto es necesario calcular la carga crítica que provoca el pandeo. Verificando la relación entre carga crítica y la carga máxima de diseño sobre el aislador sea igual o mayor al factor de seguridad $F_s = 2$. Esto es:

$$\frac{P_{crit}}{P} \geq 2$$

La P_{crit} se puede obtener con la fórmula de Euler:

$$P_{crit} = \sqrt{P_s * P_e}$$

Donde:

$$\begin{aligned} - P_s &= \frac{G * A * Hc}{tr} \\ - P_e &= \frac{\pi^2 * E_c * I}{Hc^2} \end{aligned} \quad \text{Siendo: } I = D^4/64 \quad \text{y} \quad E_c = 6 * G * S^2$$

Sustituyendo en la ecuación de la carga crítica:

$$P_{crit} = \sqrt{\frac{G^2 * \pi^4 * D^8 * 2}{256 * Hc^2 * tr^2}}$$



Reduciendo términos.



$$P_{crit} = \frac{3.5 * G * D^4}{16 * H_c * tr}$$

Sustituyendo.

$$P_{crit} = \frac{3.5 * 71,380.1 \frac{kgf}{m^2} * (0.65m)^4}{16 * 0.1624m * 0.0203m}$$

$$P_{crit} = 845,466.84kgf$$

Verificando la relación Pcrit/P.

$$\frac{845,466.84kgf}{257,040kgf} = 3.29 > 2$$

Por lo tanto, **cumple**.

De esta manera las propiedades del aislador necesarias para su modelado matemático en Sap2000, son (TABLA 16):

Tabla 16.- Propiedades del aislador (LRB).

Propiedades del aislador (LRB)	Valor
Amortiguamiento efectivo (beef)	0.1403
Fuerza de fluencia (Fy)	18378.36 kgf
Deformación máxima (dm)	0.41 m
Rigidez vertical (Kv)	56006604.6 kgf/m
Rigidez elástica (Ke)	1380833.8 kgf/m
Rigidez postfluencia (Kd)	0.1*Ke
Rigidez efectiva (Keff)	178833.624 kgf/m



4.- Periodos de retorno

Un periodo de retorno se mide en años y es el valor inverso de la probabilidad anual de que una intensidad dada sea excedida. A este valor inverso del periodo de retorno se le llama tasa de excedencia.

Con base en un estudio de peligro sísmico se obtuvieron las intensidades correspondientes a diferentes periodos de retorno como función de la localización del sitio en estudio. La tabla 17 muestra las aceleraciones correspondientes a cuatro periodos de retorno para cada zona sísmica considerada.

Tabla 17.-Periodos de retorno.

Zona sísmica a distancia cercana a epicentros				
Periodo de retorno (s)	100	500	1000	2500
Aceleración (cm/s ²)	427	831	1100	1390

Zona sísmica a distancia cercana a epicentros				
Periodo de retorno (s)	100	500	1000	2500
Aceleración (cm/s ²)	427	831	1100	1390

Zona sísmica a distancia cercana a epicentros				
Periodo de retorno (s)	100	500	1000	2500
Aceleración (cm/s ²)	427	831	1100	1390

Estas aceleraciones corresponden a la aceleración máxima del terreno esperada que son la ordenada al origen de los espectros de respuesta, como se indica en los registros sísmicos utilizados (TABLA 1 – 3).

Para que los registros tengan estas aceleraciones máximas, se deben escalar de acuerdo con lo siguiente:

$$\frac{\text{Aceleración de periodo de retorno}}{\text{Máxima aceleración del registro sísmico}} = \text{Factor } Tr$$



Este factor de escalamiento Tr multiplica a todas las ordenadas del espectro de respuesta, las cuales corresponden (en este trabajo) a los periodos desde los 0 segundos hasta los 4 segundos con un incremento por intervalo de 0.01 segundos.

A continuación, se muestra a manera de ejemplo el procedimiento, realizándolo para el espectro correspondiente al registro sísmico “AZIH8509.211” de la estación del aeropuerto de Zihuatanejo Gro. correspondiente al temblor del 21 de septiembre de 1985.

Se encuentra en zona sísmica cercana al epicentro, por lo tanto, se toman las correspondientes aceleraciones. La aceleración máxima del registro es:

$$157.04 \frac{cm}{s^2}$$

Por lo tanto, para 100 años:

$$\frac{427 \frac{cm}{s^2}}{157.04 \frac{cm}{s^2}} = 2.72$$

Para 500 años:

$$\frac{831 \frac{cm}{s^2}}{157.04 \frac{cm}{s^2}} = 5.3$$

Para 1,000 años:

$$\frac{1,100 \frac{cm}{s^2}}{157.04 \frac{cm}{s^2}} = 7.0$$

Para 2,500 años:

$$\frac{1,390 \frac{cm}{s^2}}{157.04 \frac{cm}{s^2}} = 8.85$$



Estos factores multiplican a todas las aceleraciones del espectro, dándonos un escalamiento para cada periodo de retorno (TABLA 18).

Tabla 18.- Espectro escalados según su periodo de retorno.

AZIH8509		Tr = 100	Tr =500	Tr = 1,000	Tr = 2.500
PERIODO	ACELERACIÓN	FcTr = 2.72	FcTr = 5.3	FcTr = 7.0	FcTr =8.85
0	157.0362884	427.000	831.000	1100.000	1390.000
0.02	160.5934243	436.672	849.824	1124.917	1421.486
0.03	162.8170167	442.718	861.590	1140.493	1441.168
0.04	161.7946031	439.938	856.180	1133.331	1432.118
0.05	179.8224568	488.958	951.579	1259.611	1591.691
0.06	177.3631926	482.271	938.565	1242.385	1569.923
0.07	204.2143757	555.283	1080.656	1430.471	1807.595
0.08	238.0734719	647.350	1259.830	1667.645	2107.297
0.09	248.4500593	675.565	1314.741	1740.331	2199.145
0.1	247.600306	673.254	1310.244	1734.378	2191.624
.
.
.
3.91	52.23019664	142.020	276.390	365.859	462.313
3.92	52.00998166	141.421	275.225	364.317	460.364
3.93	51.78152114	140.800	274.016	362.717	458.342
3.94	51.5450265	140.157	272.764	361.060	456.249
3.95	51.3007081	139.493	271.472	359.349	454.086
3.96	51.04877511	138.808	270.138	357.584	451.856
3.97	50.79727494	138.124	268.808	355.822	449.630
3.98	50.5398442	137.424	267.445	354.019	447.351
3.99	50.2752641	136.704	266.045	352.166	445.009
4	50.00373811	135.966	264.608	350.264	442.606

Este mismo procedimiento se debe realizar con los espectros a considerar en el trabajo, en este caso son 35 en total.

ESPECTROS DE REGISTRO A DISTANCIA CERCANA AL EPICENTRO

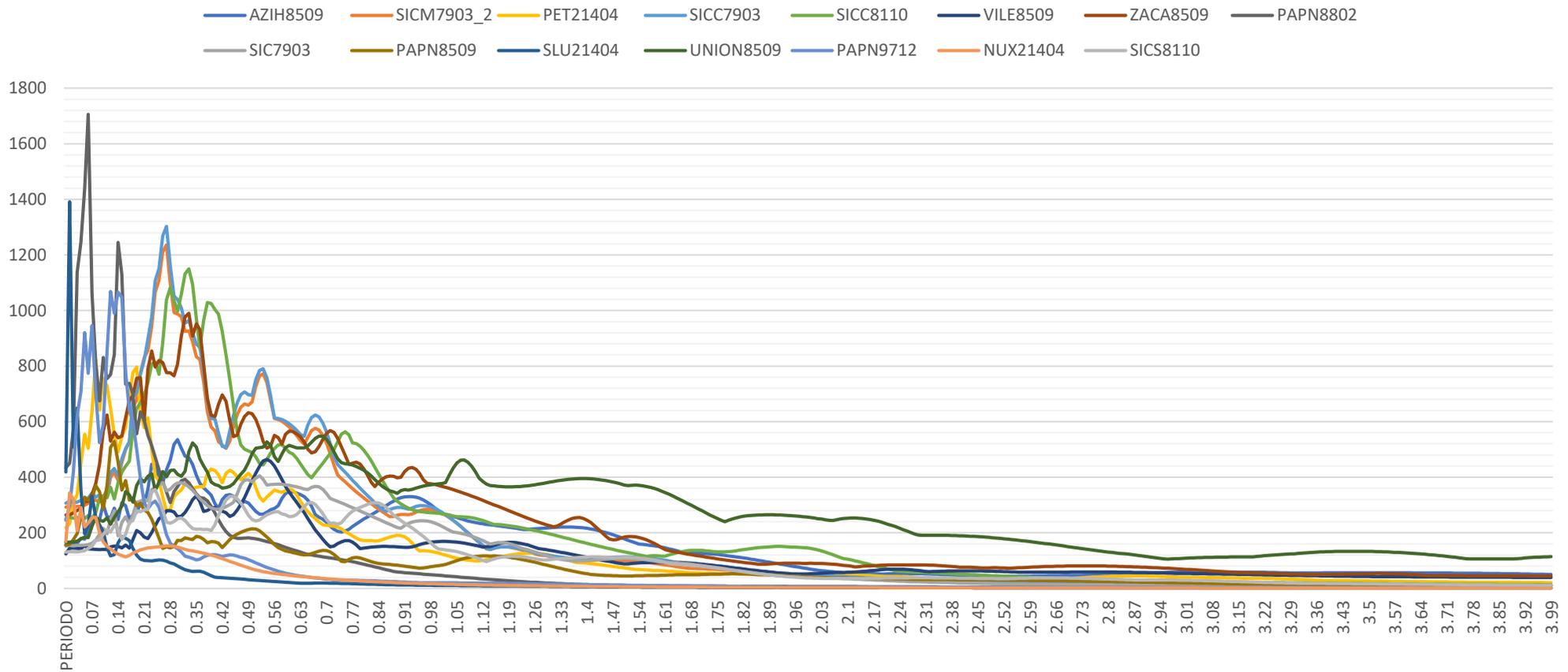


Figura 60.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro.

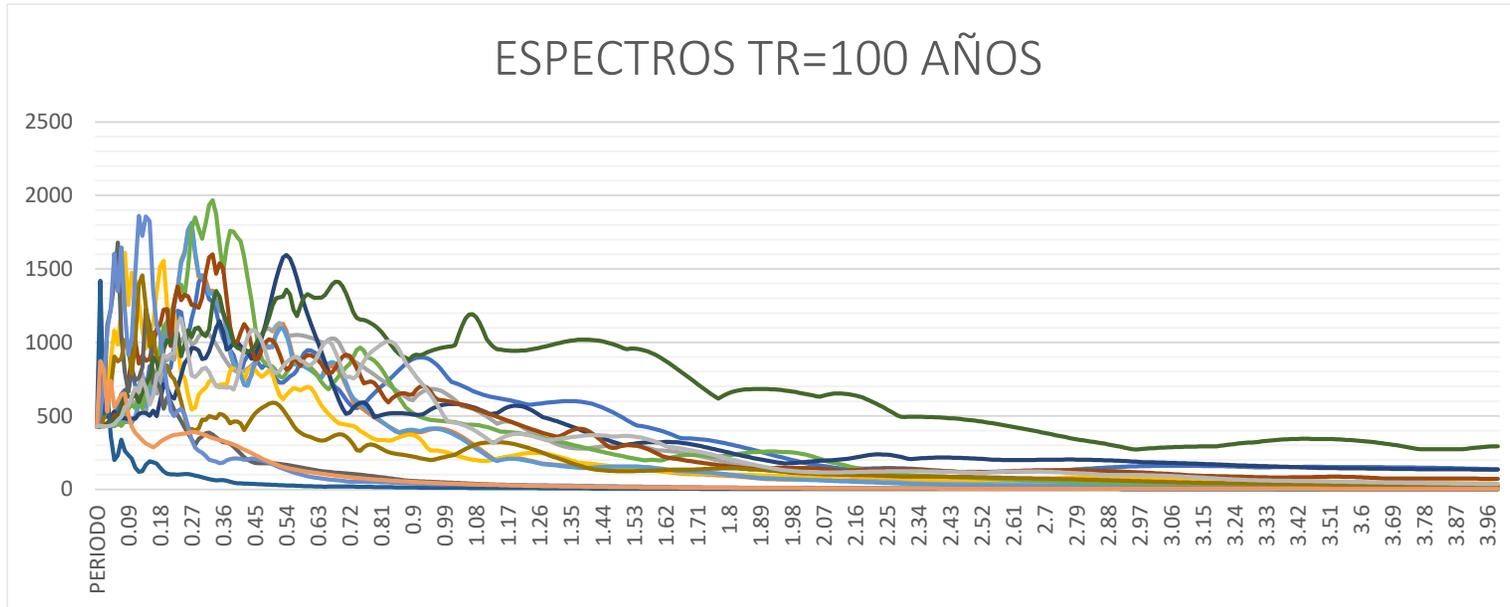


Figura 62.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro para TR =100.

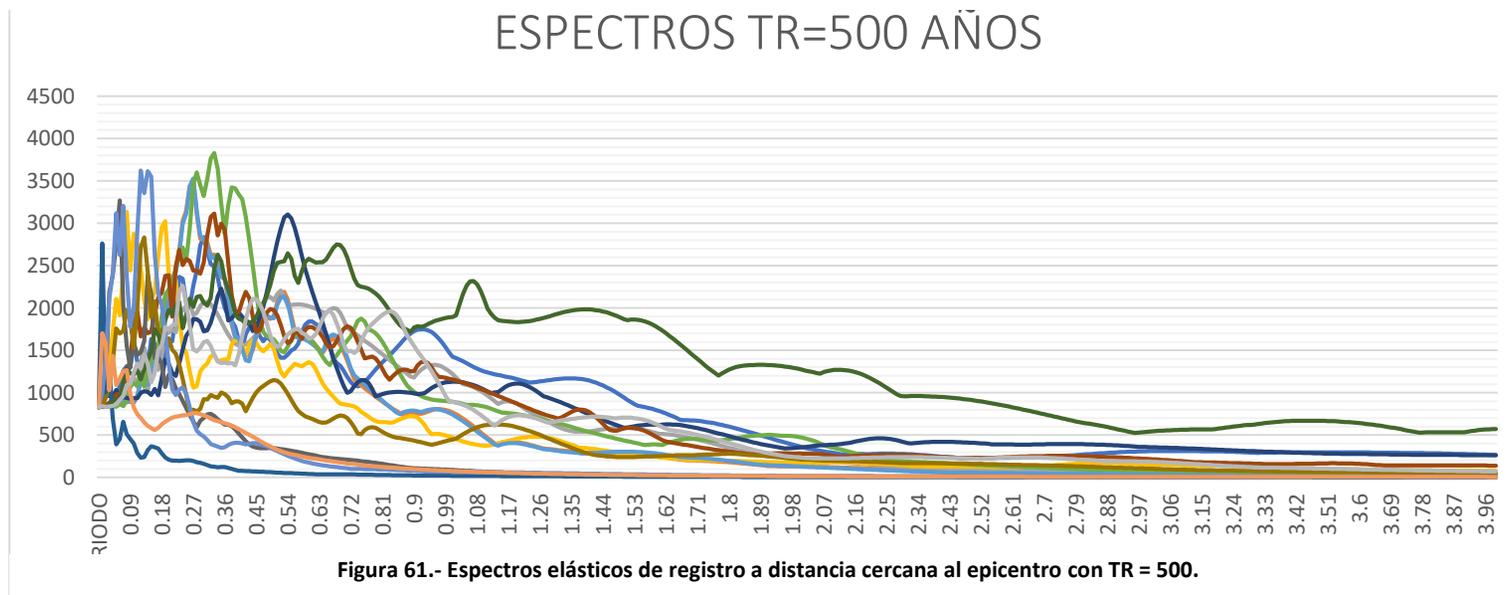


Figura 61.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro con TR = 500.

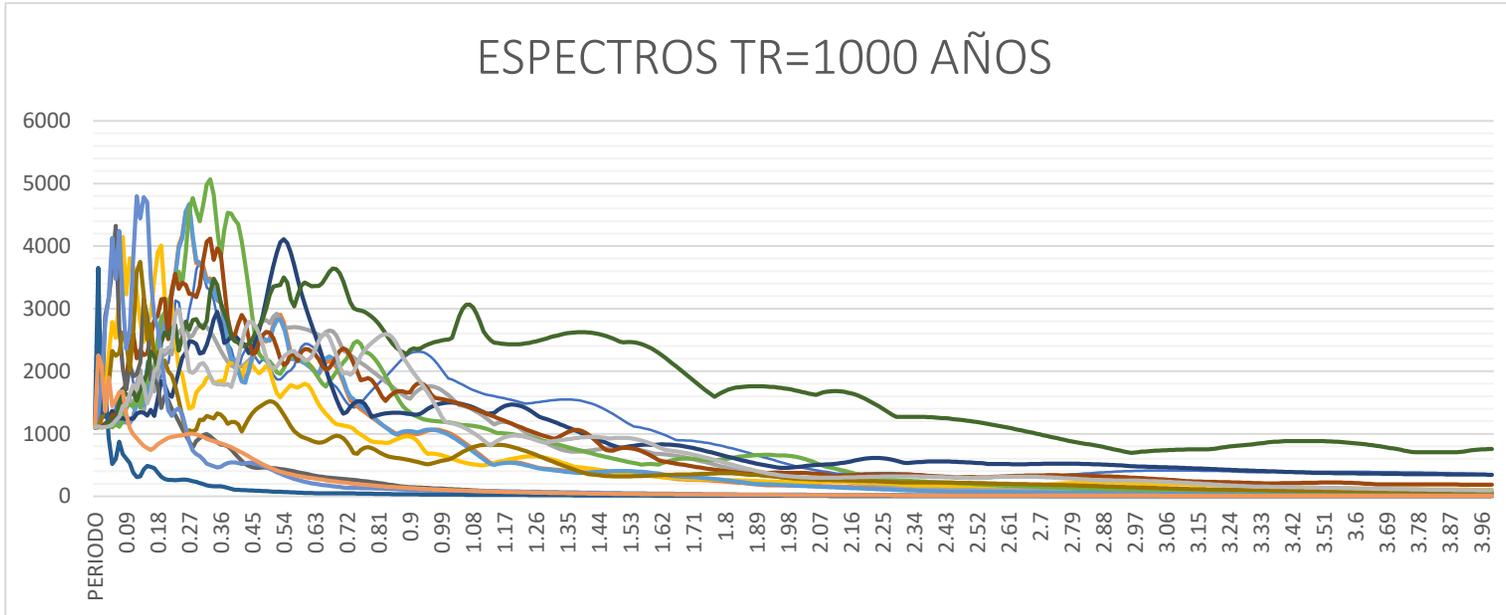


Figura 64.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro con TR = 1,000.

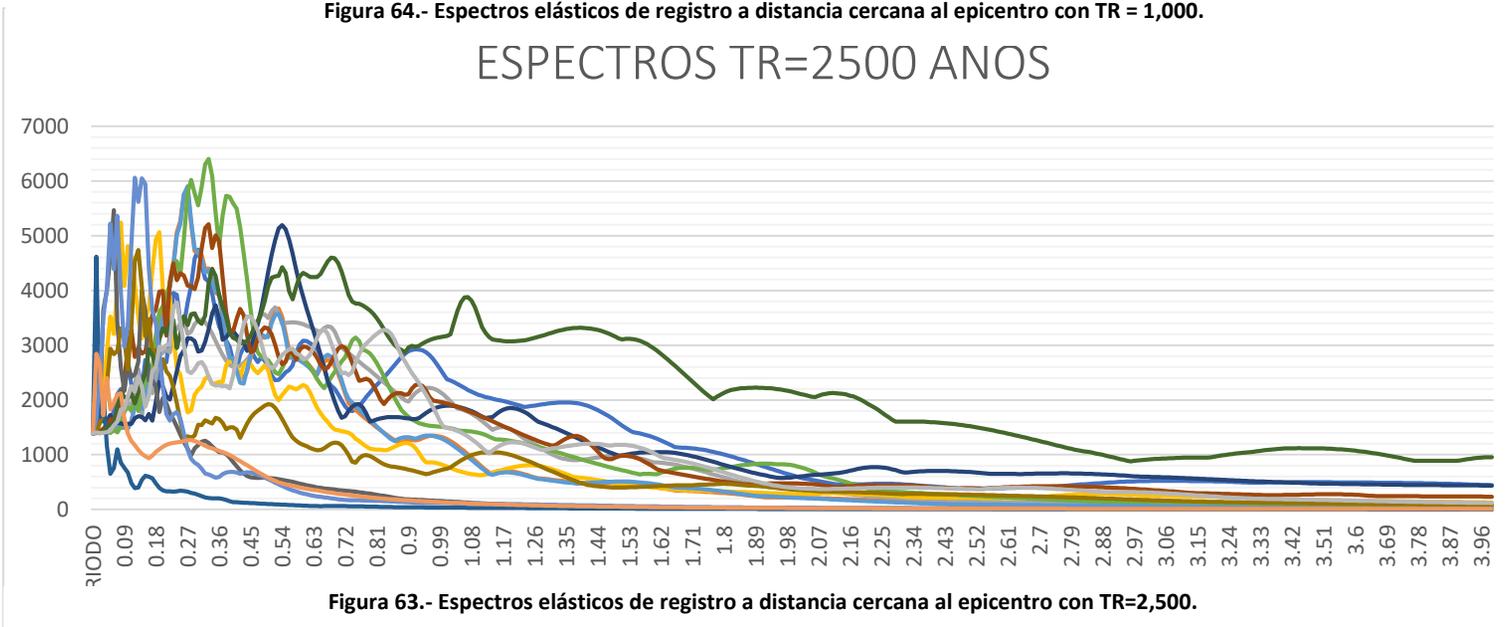


Figura 63.- Espectros elásticos de registro a distancia cercana al epicentro con TR=2,500.

ESPECTROS DE REGISTRO A DISTANCIA MEDIA AL EPICENTRO

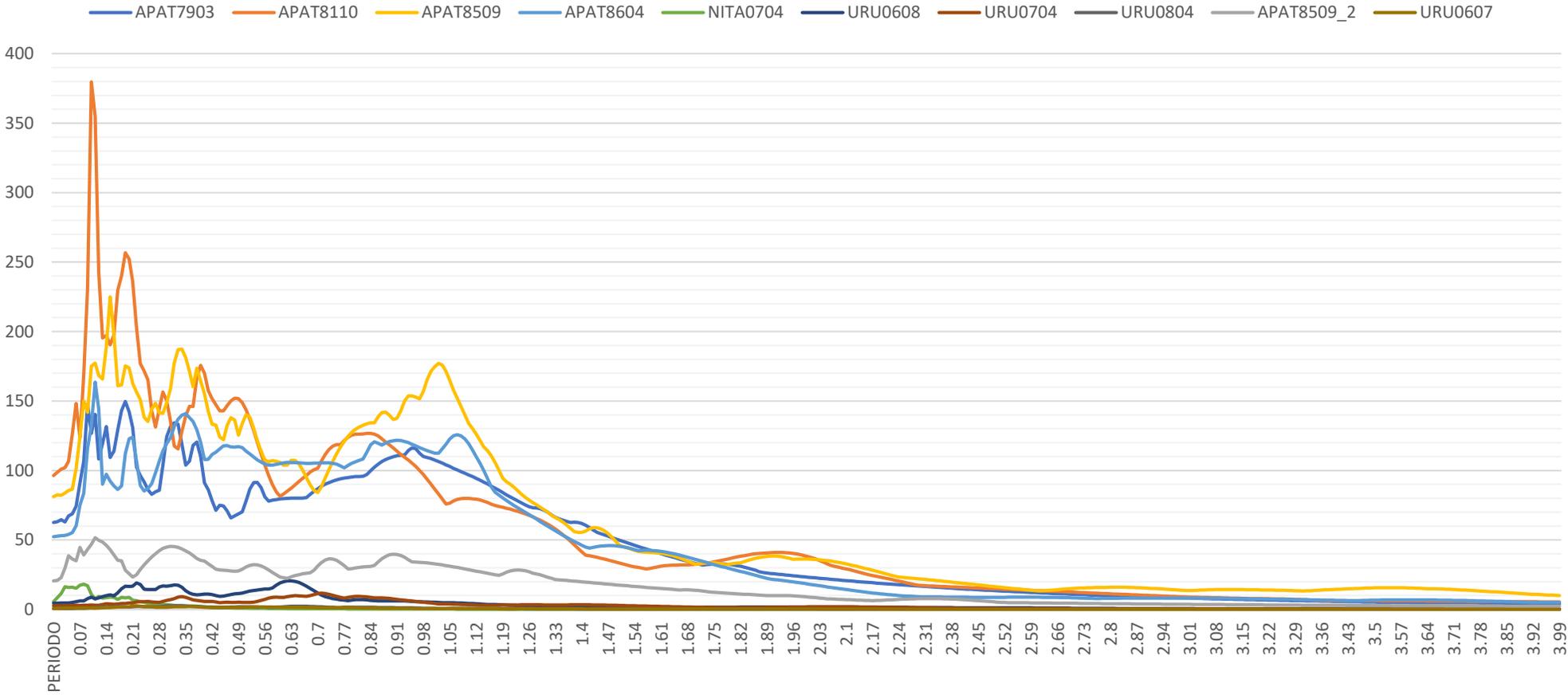


Figura 65.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro.

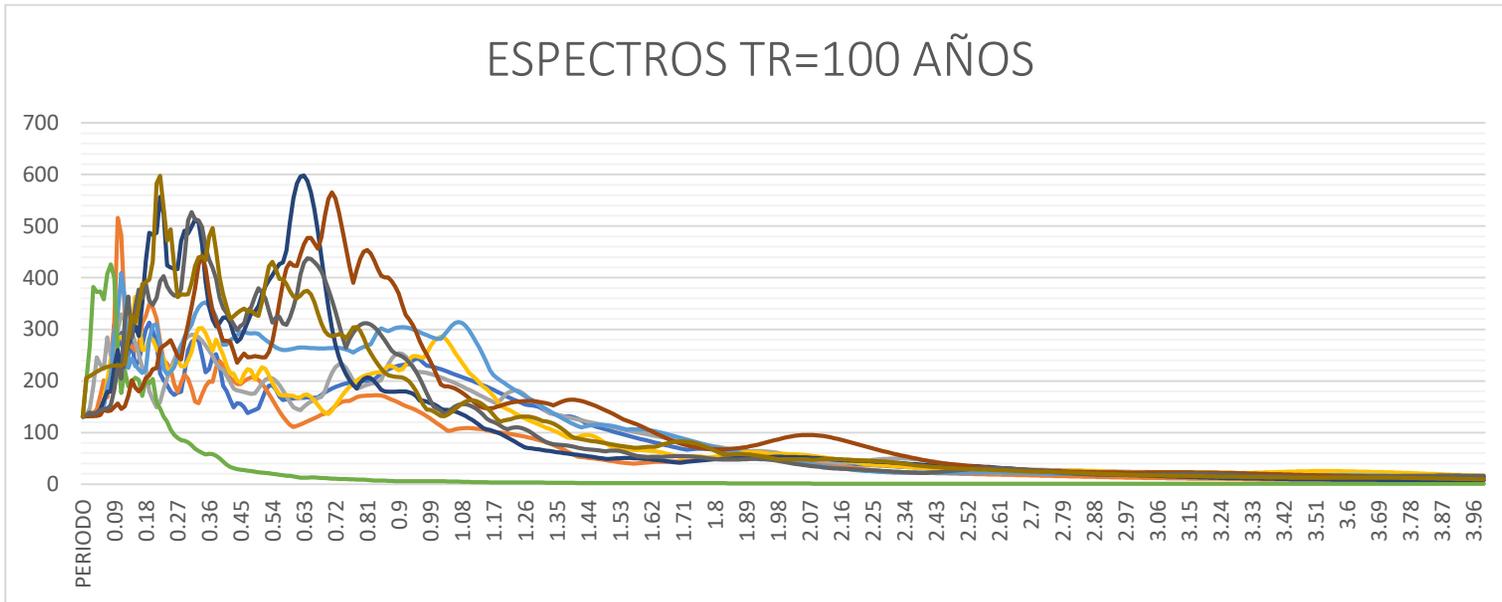


Figura 67.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=100.

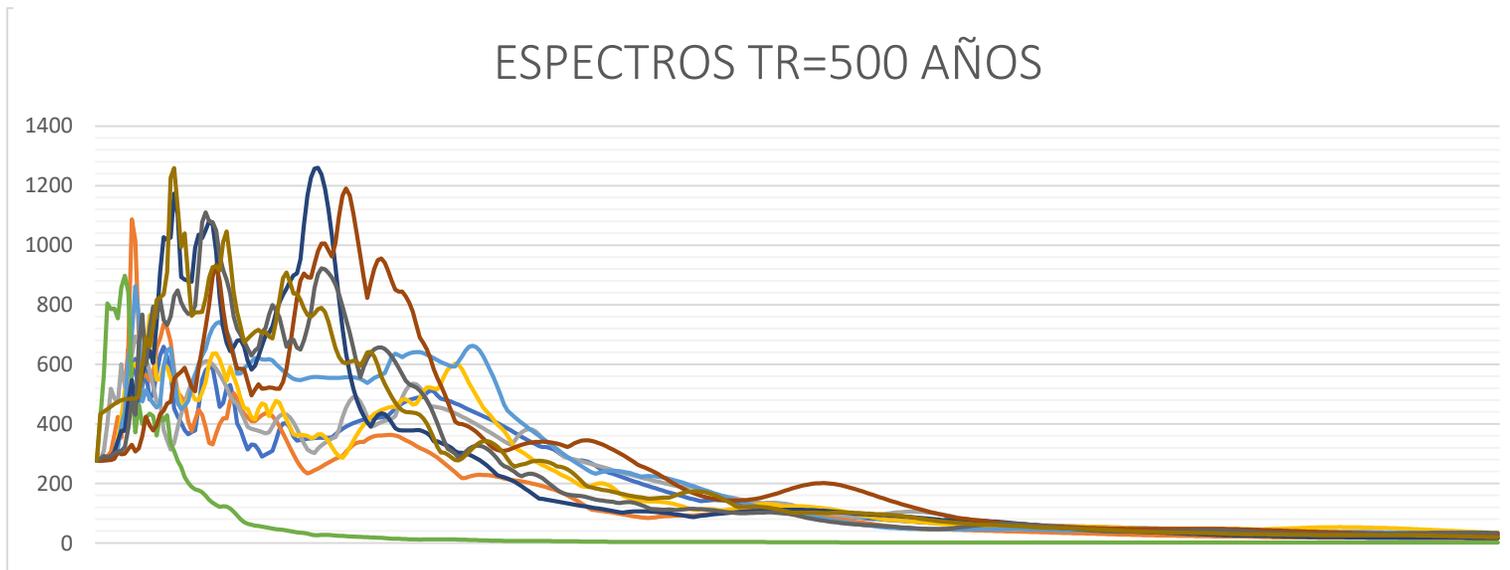


Figura 66.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=500.

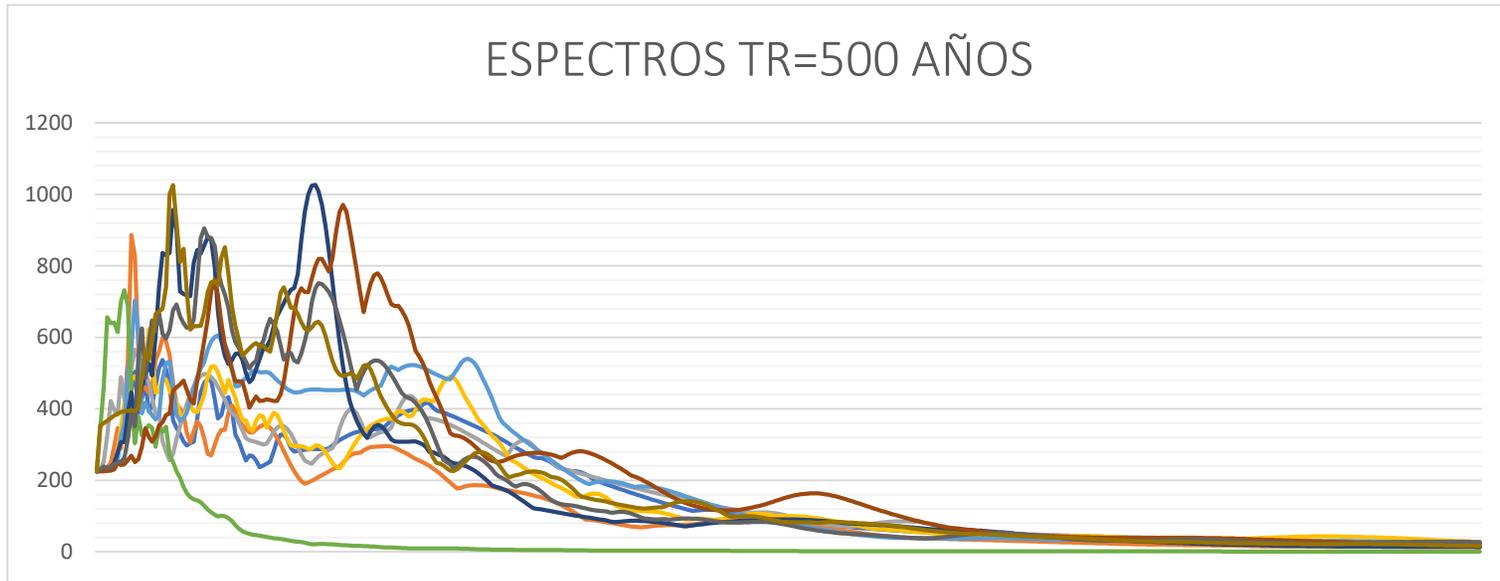


Figura 69.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=1,000.

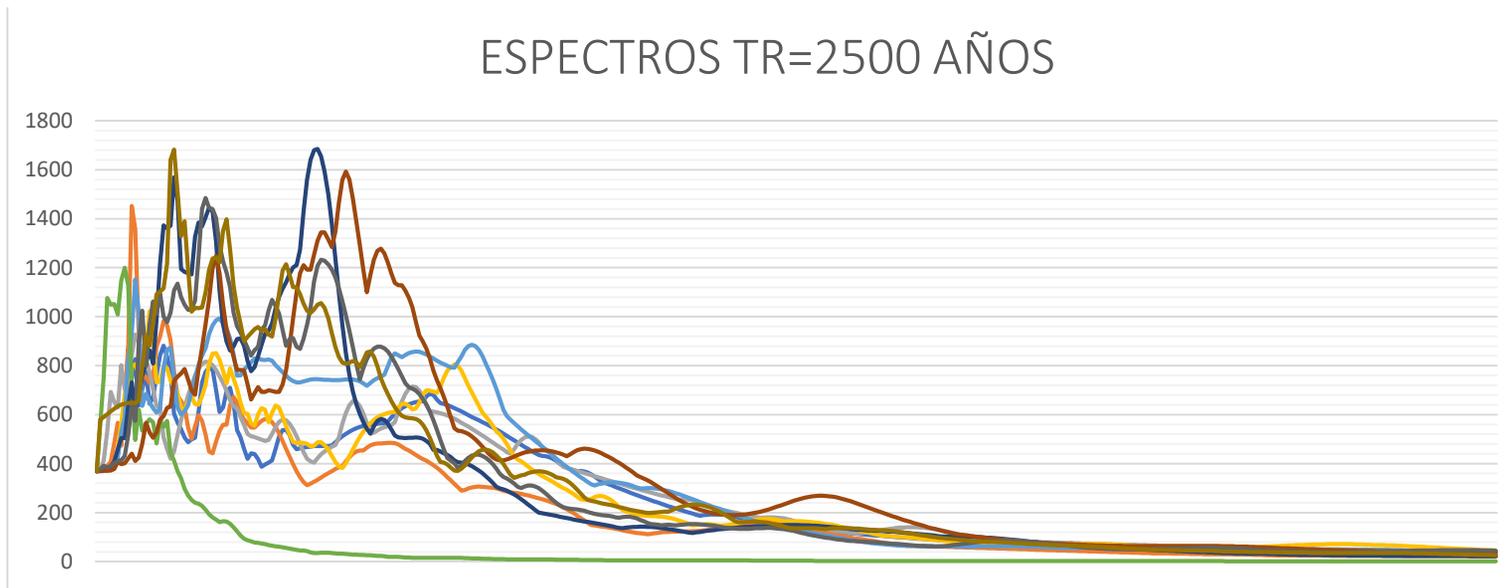


Figura 68.- Espectros elásticos de registro a distancia media al epicentro con TR=2,500.

ESPECTROS DE REGISTRO A DISTANCIA LEJANA AL EPICENTRO

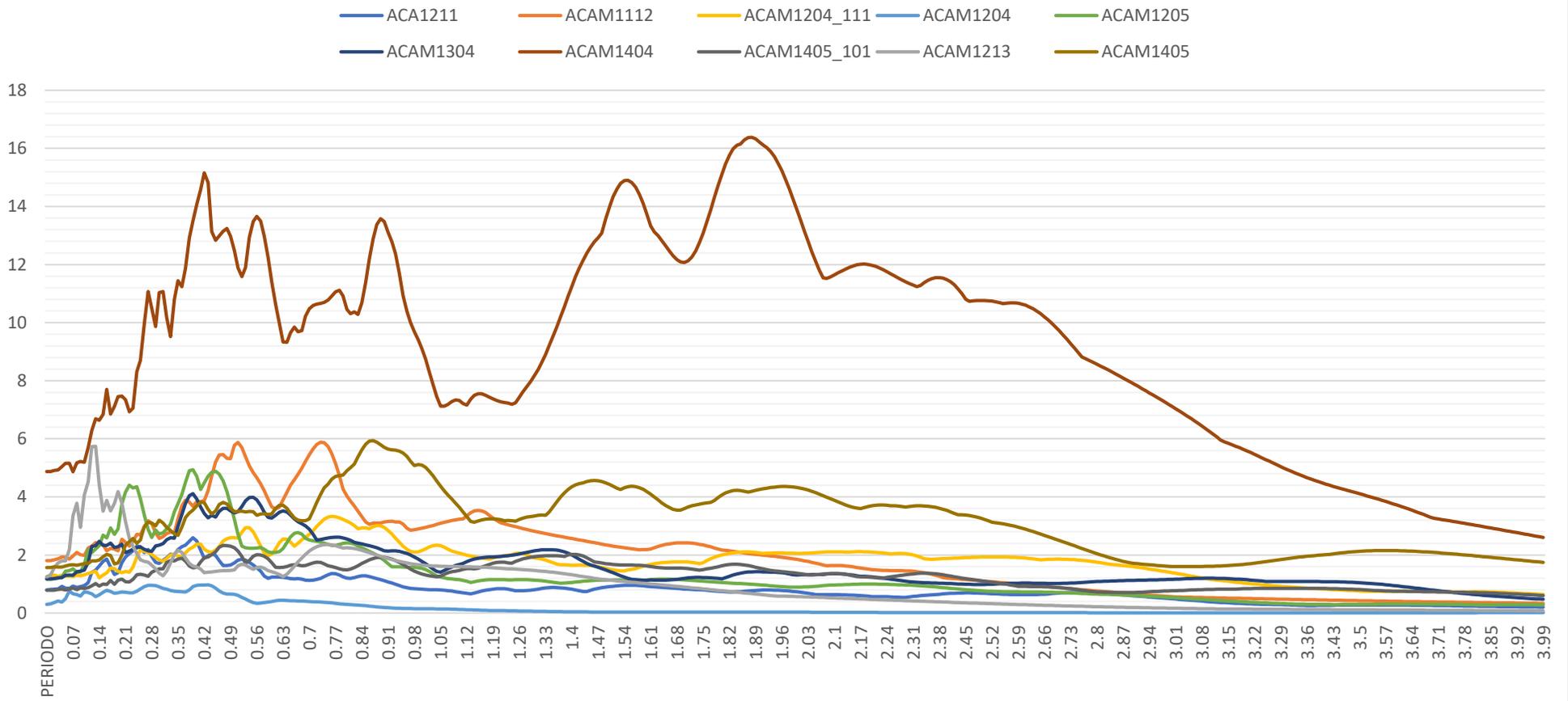


Figura 70.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro.

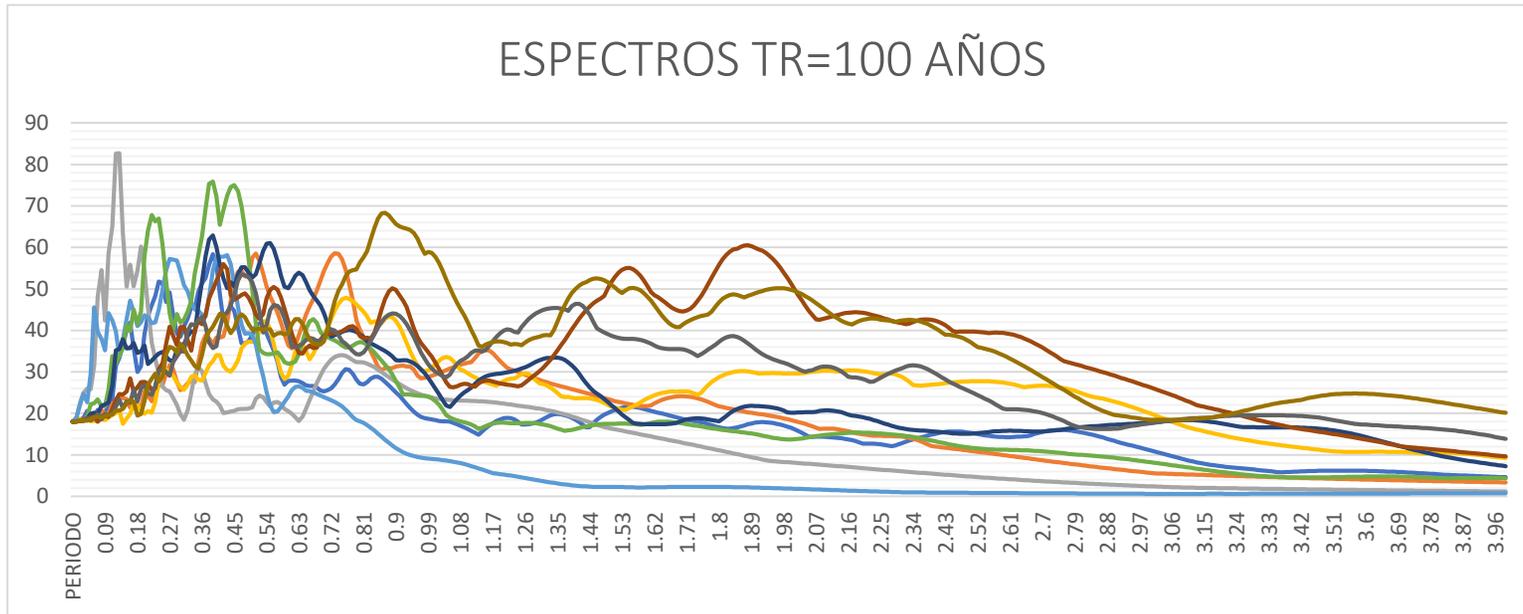


Figura 72.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro con TR= 100.

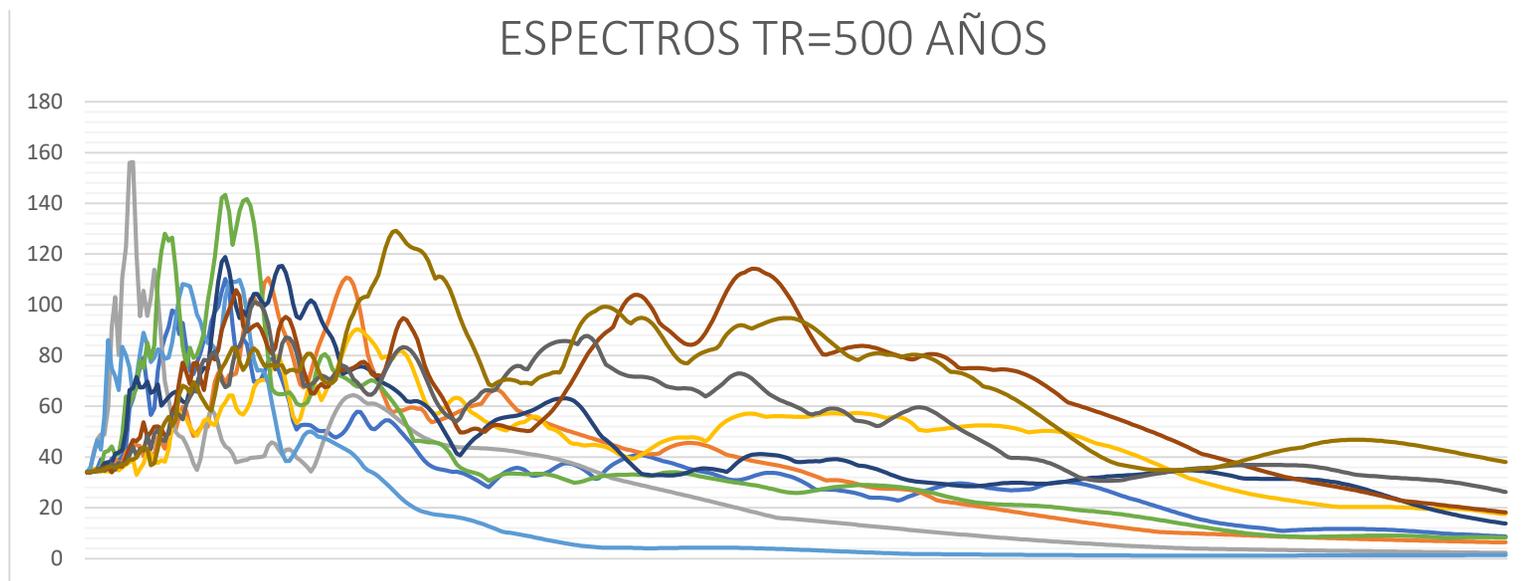


Figura 71.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro. con TR=500.

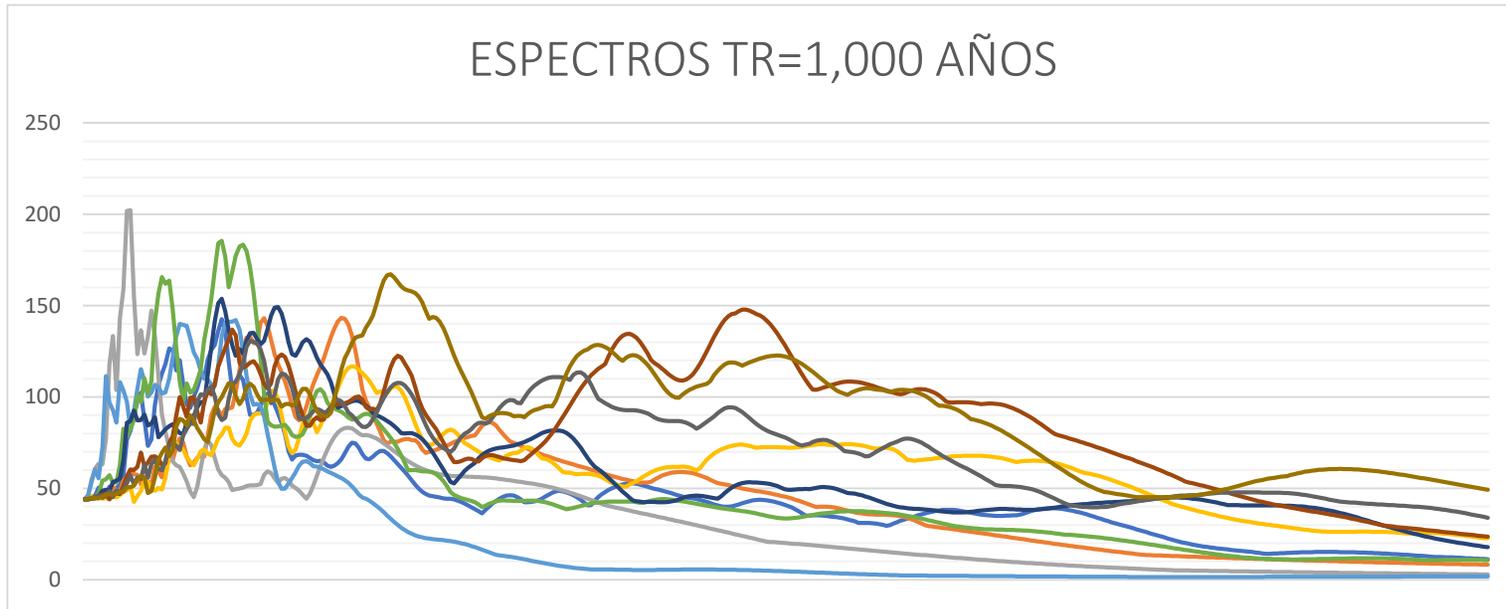


Figura 74.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro. con TR=1,000.

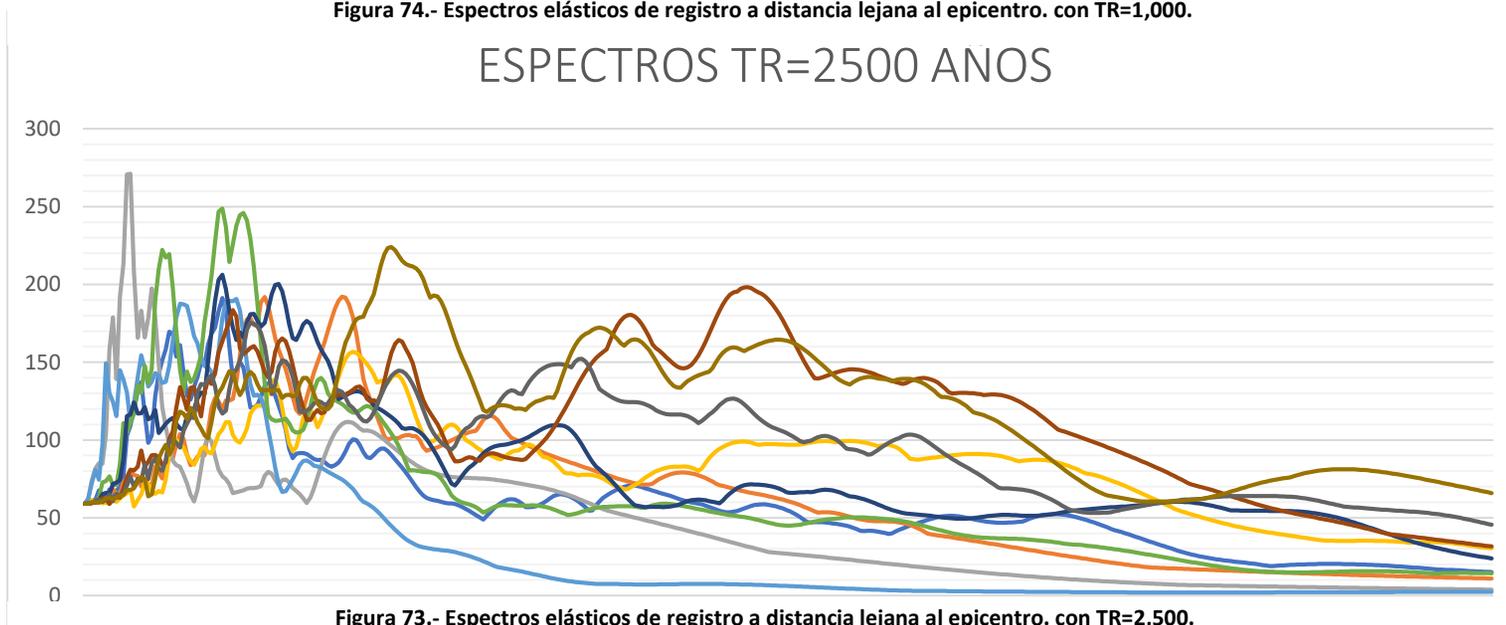


Figura 73.- Espectros elásticos de registro a distancia lejana al epicentro. con TR=2,500.



Cada uno de estos espectros debe incluirse para el análisis, sin embargo, ya que el escalamiento de los espectros es lineal, Sap2000 nos permite escalar directamente los espectros al multiplicarlos por su factor, por lo tanto, se calculan los factores para todos los espectros y sus respectivos periodos de respuesta (TABLA 19).

Tabla 19.- Factores de escala de espectros.

Factores para espectros				
Factores para espectros con epicentro a distancia cercana a la costa				
Periodo de retorno	100	500	1000	2500
	AZIH8509.211			
Factor Tr	2.719116736	5.29177051	7.004750375	8.851457292
	NUX21404.182			
Factor Tr	2.540200071	4.943574377	6.543840932	8.269035359
	PAPN8509.191			
Factor Tr	2.749101632	5.350125189	7.081994836	8.949066201
	PAPN8802.081			
Factor Tr	0.984140881	1.915271832	2.535257539	3.203643618
	PAPN9712.221			
Factor Tr	1.742250303	3.390655742	4.488232631	5.67149396
	PET21404.182			
Factor Tr	1.95281956	3.800452118	5.030682707	6.356953602
	SICC7903.141			
Factor Tr	1.391309742	2.707677742	3.584170296	4.52908792
	SICC8110.251			
Factor Tr	1.710345834	3.328565311	4.406043131	5.567636321
	SICM7903.141			
Factor Tr	1.459090683	2.83958866	3.758781619	4.749733137
	SIC7903.141			
Factor Tr	2.800055387	5.449288119	7.213257437	9.114934398



SICS8110.251				
Factor Tr	3.266470125	6.356994553	8.414794234	10.63323999
SLU21404.182				
Factor Tr	1.019188604	1.983479461	2.625544413	3.317733394
UNIO8509.191				
Factor Tr	2.579258421	5.019587231	6.644459632	8.396180808
VILE8509.191				
Factor Tr	3.43776468	6.690357023	8.856068262	11.19084989
ZACA8509.191				
Factor Tr	1.615822361	3.144609794	4.16254004	5.259936959
Factores para espectros con epicentro a distancia media la costa				

Periodo de retorno	100	500	1000	2500
APAT7903				
Factor Tr	6.81344118	13.25988202	17.55219039	22.17958604
APAT8110				
Factor Tr	4.427181934	8.615897395	11.40491833	14.41166953
APAT8509_2				
Factor Tr	20.78528967	40.450997	53.54524272	67.6617158
APAT8509				
Factor Tr	5.258633705	10.23401548	13.54683156	17.11826897
APAT8604				
Factor Tr	8.15223431	15.8653553	21.00107199	26.53771825
NITA0704				
Factor Tr	76.33855358	148.5651944	196.6566954	248.5025515
URU0608				
Factor Tr	94.82464466	184.5416387	244.2789441	308.6797566
URU0704				
Factor Tr	157.2457088	306.0215082	405.0826222	511.8771317
URU0804				



Factor Tr	621.6532312	1209.821628	1601.448605	2023.648692
	URU0607			
Factor Tr	737.9894977	1436.227805	1901.143905	2402.354571

Factores para espectros con epicentro a distancia lejana a la costa
--

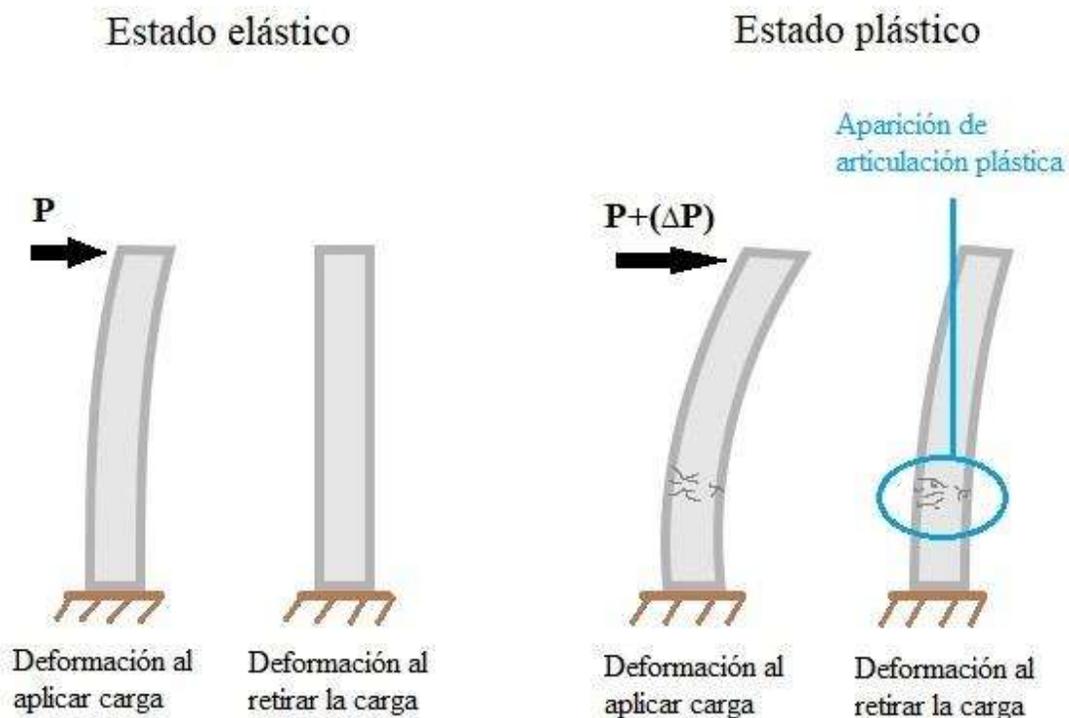
Periodo de retorno	100	500	1000	2500
	ACA1211			
Factor Tr	533.92038	1039.081583	1375.438918	1738.054633
	ACAM1112			
Factor Tr	236.3417661	459.9531795	608.8429573	769.3561005
	ACAM1213			
Factor Tr	341.6221808	664.8431668	880.0571402	1112.072204
	ACAM1204_111			
Factor Tr	340.4934014	662.6464088	877.1492776	1108.397724
	ACAM1204			
Factor Tr	1422.480388	2768.340052	3664.469383	4630.556766
	ACAM1205			
Factor Tr	364.7685666	709.8891776	939.684832	1187.419924
	ACAM1304			
Factor Tr	363.2374428	706.9094027	935.740485	1182.435704
	ACAM1404			
Factor Tr	87.5929287	170.4677371	225.6492308	285.1385735
	ACAM1405_101			
Factor Tr	544.0715169	1058.837074	1401.589388	1771.099317
	ACAM1405			
Factor Tr	273.0875038	531.4653762	703.5041081	888.973373



5.- Análisis estático no lineal.

El análisis estático no lineal es la aplicación de carga lateral sobre la estructura hasta llegar a al desplazamiento que provoque su estado de falla o colapso, este método también es conocido como “pushover”. Esto nos indica la capacidad de la estructura ante las fuerzas laterales, dándonos una curva de capacidad, la cual es una relación entre las fuerzas laterales y los desplazamientos.

Para realizar este análisis es necesario definir el comportamiento de las articulaciones plásticas. Las articulaciones plásticas son creadas en los elementos estructurales cuando se supera su límite elástico y comienza el comportamiento no lineal, en el cual sus fibras sufren deformaciones permanentes, estas deformaciones disipan energía y son conocidas como articulaciones plásticas.





El comportamiento de estas articulaciones plásticas depende de la sección transversal de los elementos estructurales (en este caso de las columnas), las características de los materiales y las cargas a las que se encuentra sometido.

5.1.- Longitud de la rótula plástica.

La longitud de la articulación plástica se obtiene con la expresión propuesta por Priestley (1996).

$$L_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \geq 0.044d_b f_y$$

Donde:

- L = Longitud de la base al punto de inflexión de la columna. Se considera que el punto de inflexión será en el centro de la columna para doble curvatura y la longitud total en curvatura simple
- d_b = Diámetro del acero longitudinal (0.0445m)
- f_y = fuerza de fluencia del acero en MPa (411.88MPa).

En este trabajo se realiza el análisis en la dirección longitudinal (Y o U2) y transversal del puente (X o U1). Debido a que en dirección trasversal se encuentra la subestructura tipo marco, genera restricciones en las columnas, causando que se generen deformaciones de doble curvatura y su punto de inflexión sea el centro, por lo que en el análisis de esta dirección se considera la mitad de la longitud de la columna. Sin embargo, en la dirección longitudinal se deforman en curvatura simple, por lo tanto, en el análisis de esta dirección se considera la longitud total de la columna.

- Para la dirección transversal.

Sustituyendo

$$L_p = 0.08(3m) + 0.022(0.0445m)(411.88MPa) \geq 0.044(0.0445m)(411.88MPa)$$

$$L_p = 0.643 \leq 0.806$$



Por lo tanto,

$$L_p = 0.806m$$

Se calcula la longitud relativa de la articulación plástica

$$L_{relativa} = \frac{L_p}{Longitud\ de\ la\ columna}$$

$$L_{relativa} = \frac{0.806m}{6m}$$

$$L_{relativa} = 0.067m$$

- Para la dirección longitudinal.

Sustituyendo

$$L_p = 0.08(6m) + 0.022(0.0445m)(411.88MPa) \geq 0.044(0.0445m)(411.88MPa)$$

$$L_p = 0.883 \geq 0.806$$

Por lo tanto,

$$L_p = 0.883m$$

Se calcula la longitud relativa de la articulación plástica

$$L_{relativa} = \frac{L_p}{Longitud\ de\ la\ columna}$$

$$L_{relativa} = \frac{0.806m}{6m}$$

$$L_{relativa} = 0.074m$$





5.2.- Definición del comportamiento de las articulaciones plásticas.

Una vez que se tiene definida la sección transversal, los materiales que la componen y las cargas a las que se someterán los distintos tipos de columnas, se describe el comportamiento de una articulación plástica, representado en una gráfica momento – curvatura (FIGURA 75).

En sap2000, está gráfica se describe con 5 puntos (A, B, C, D Y E) (FIGURA 76), donde:

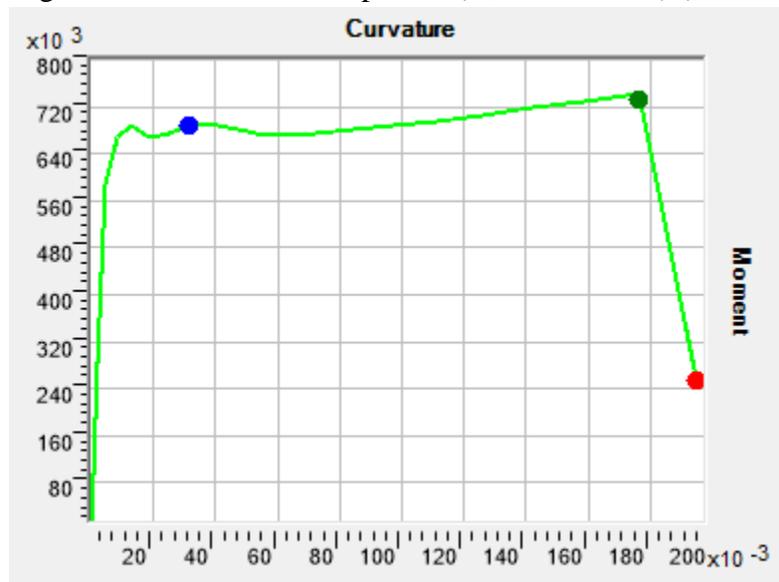


Figura 75.- Gráfica momento - curvatura de la sección transversal de la sección tipo columna descrita en este trabajo, con una carga axial nula.

- El punto A, se localiza en el (0,0).
- El punto B es considerado el momento de fluencia con un desplazamiento igual a cero ($M_y, 0$).
- El punto C se establece como el punto de mayor momento.
- El punto D como el límite de la disminución gradual del momento.
- El punto E como la máxima capacidad a rotación de la articulación.

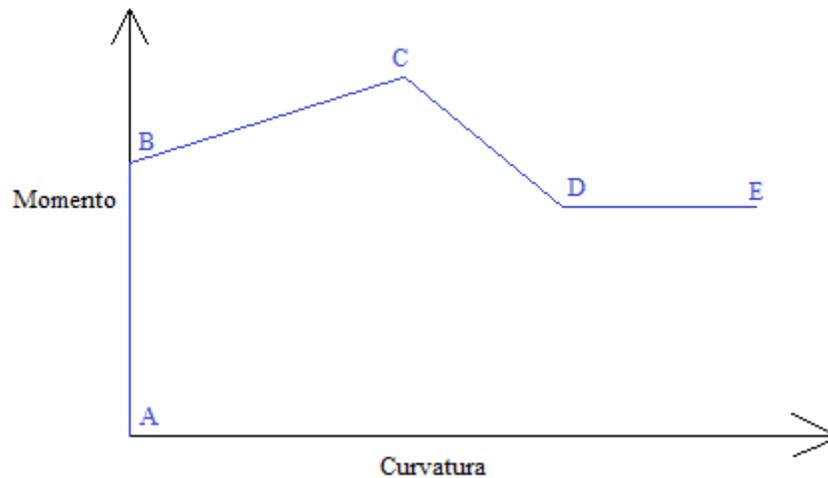


Figura 76.- Gráfica momento - curvatura, formada por cinco puntos en sap2000

En sap2000 dentro de la sección “Section designer”, se encuentra el apartado llamado “Show Moment – Curvature curve...” el cual nos muestra la gráfica momento – curvatura (FIGURA 61) de la sección diseñada, con una carga axial nula. La carga axial nula debe ser sustituida por las cargas axiales a las cuales se encontrarán sometidas por carga muerta las columnas (SECCIÓN 4.1.1), de esta manera obtenemos las gráficas necesarias para modelar el comportamiento de las articulaciones plásticas en los diferentes tipos de columnas. Para la definición de las articulaciones en sap2000 se convirtieron las curvaturas en rotaciones, esto se consigue multiplicando las curvaturas por la longitud relativa de la articulación plástica. El momento que se ingresó está normalizado respecto al momento de fluencia.

Se realiza este procedimiento para los distintos tipos de columnas, considerando para articulaciones en la dirección transversal del puente (U1 o X) la longitud relativa $L_r = 0.067m$, y para la dirección longitudinal (U2 o Y) $L_r = 0.074m$.



Para las denominadas columnas centrales centrales (CCC):

Tabla 20.- CCC Momento - Curvatura

Tipo: CCC	
Momento Idealizado	
Curvature	Moment
0	0
0	563310
0.0131	737482
0.1417	709218
0.1855	274619

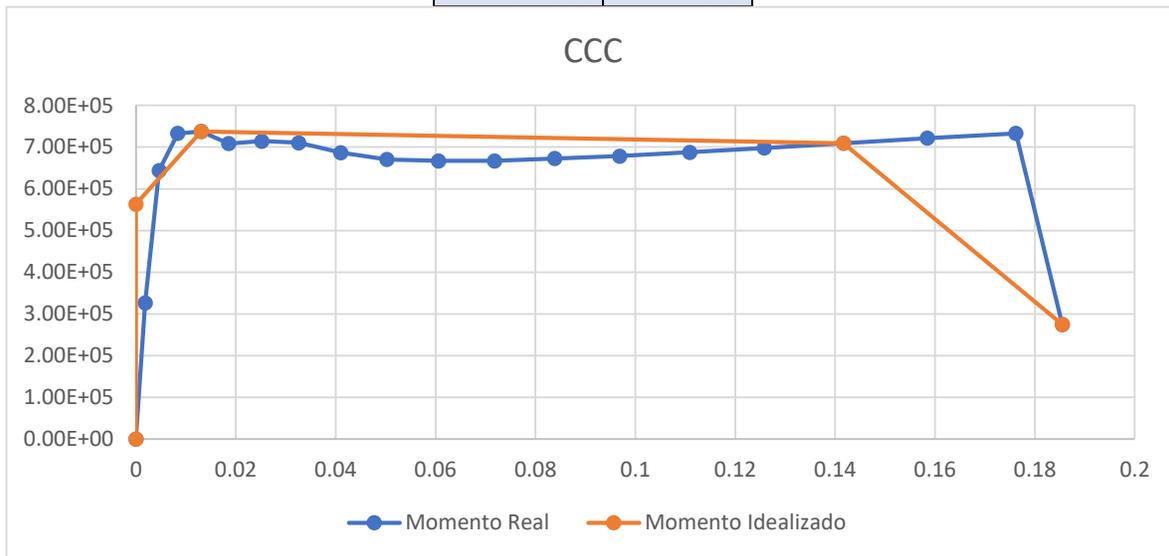


Figura 78.- CCC Gráfica momento - curvatura

El comportamiento de las articulaciones en las direcciones transversal y longitudinal para las columnas tipo (CCC) se muestra en las figuras 62 y 63.

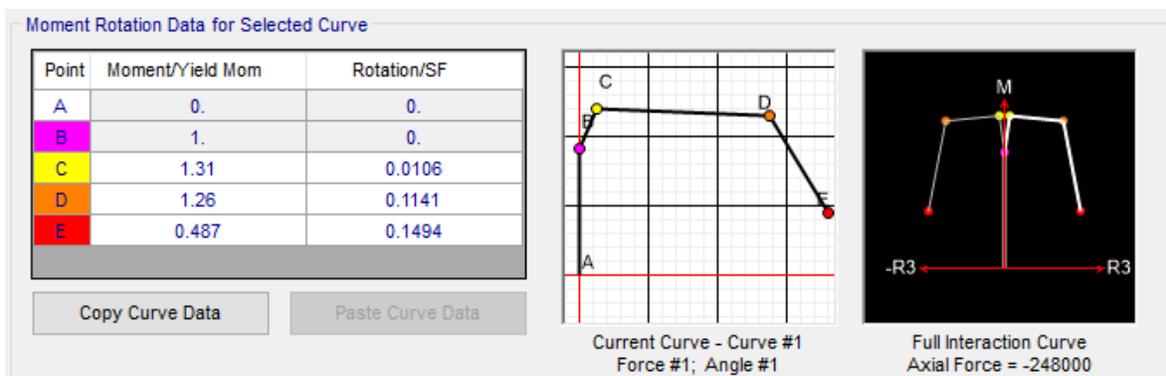


Figura 77.- Comportamiento de la articulación en dirección trasversal, columnas tipo (CCC).

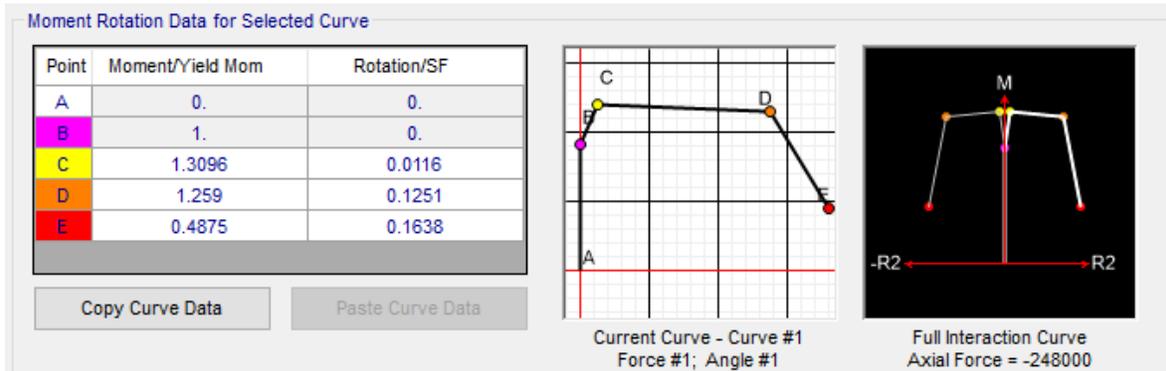


Figura 79.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CCC).

Para las denominadas columnas centrales laterales (CCL):

Tabla 21.-Momento - curvatura (CCL).

Tipo: CCL	
Momento Idealizado	
Curvature	Moment
0	0
0	521887.717
0.0131	718416
0.1184	700214
0.1948	306958

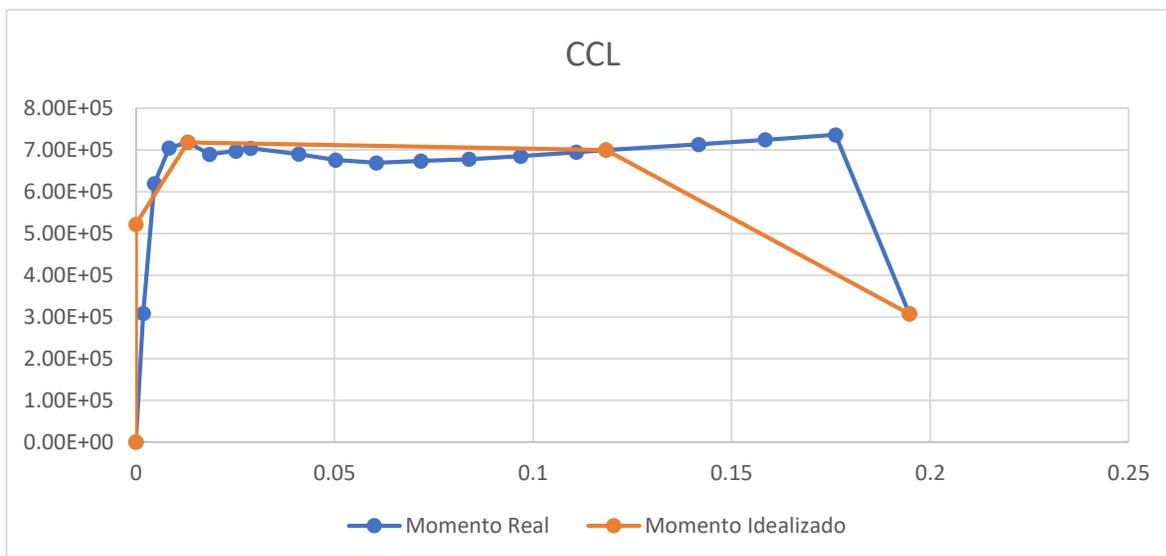


Figura 80.- CCL Gráfica momento - curvatura.



Las figuras 65 y 66 muestran el comportamiento de las articulaciones en las direcciones transversal y longitudinal para las columnas tipo (CCL).

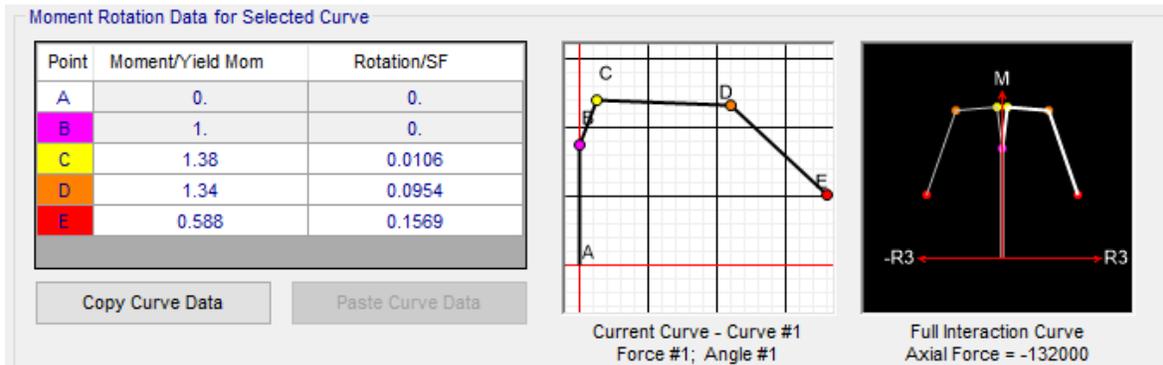


Figura 81.- Comportamiento de la articulación en dirección trasversal, columnas tipo (CCL).

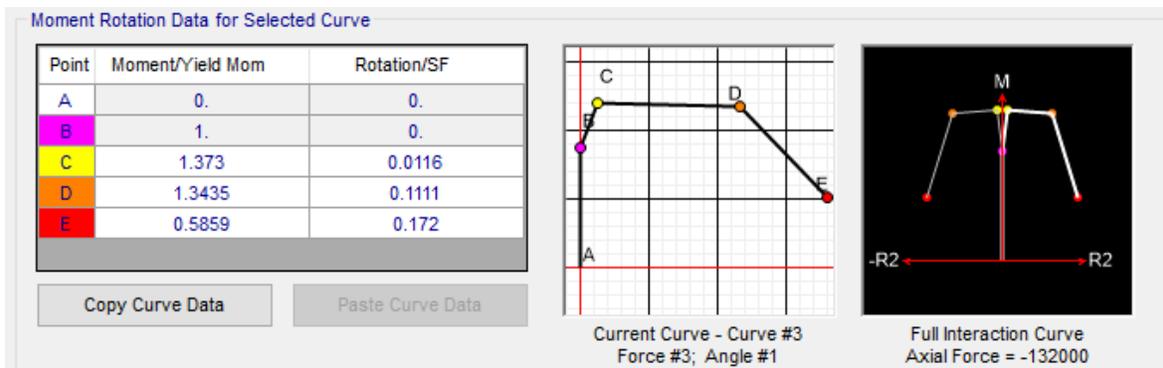


Figura 82.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CCL).

Para las columnas centrales externas (CCE):

Tabla 22.- CCE momento curvatura

Tipo: CCE	
Momento Idealizado	
Curvature	Moment
0	0
0	523927.961
0.0131	719186
0.1258	703922
0.1948	306976

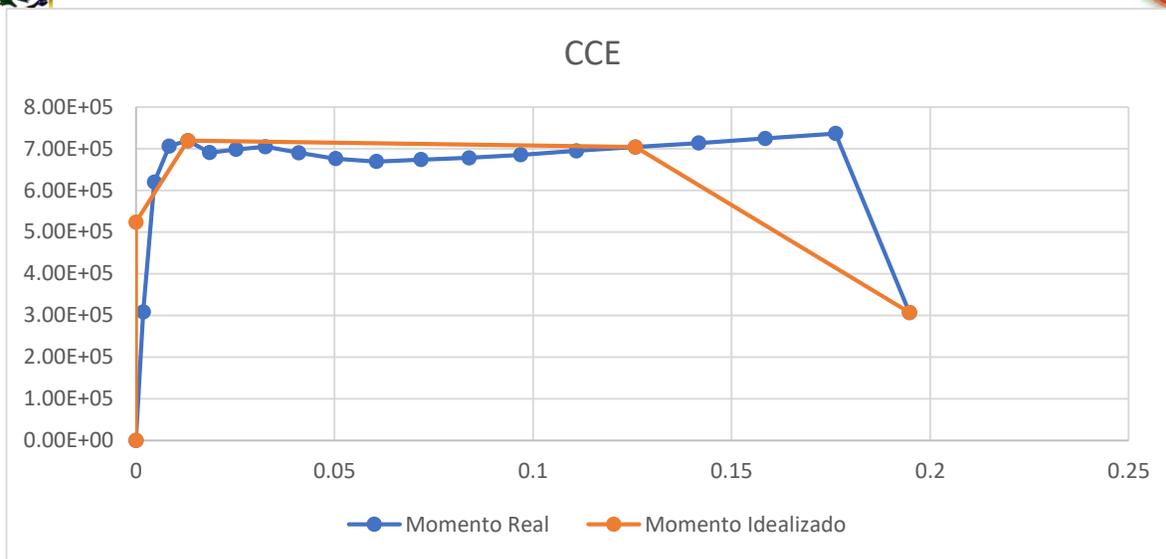


Figura 83.- CCE Gráfica momento - curvatura

El comportamiento de las articulaciones en las direcciones transversal y longitudinal para las columnas tipo (CCE) se encuentra en las figuras 67 y 68.

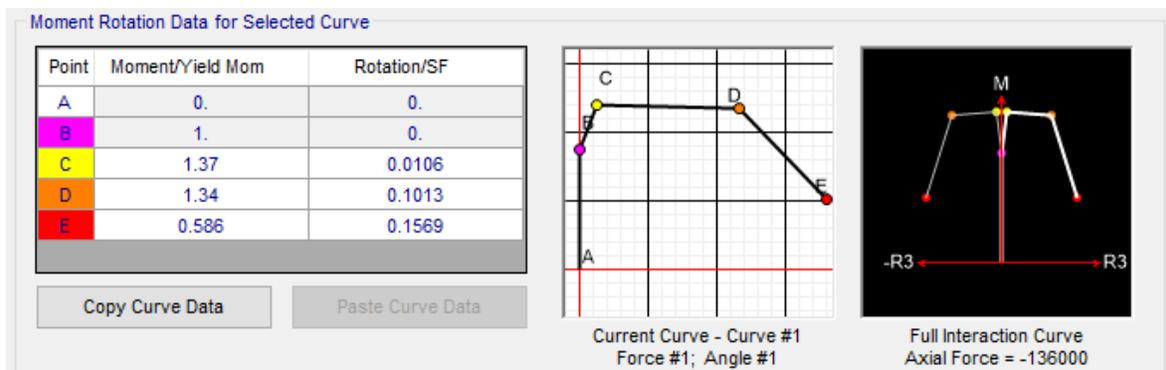


Figura 84.- Comportamiento de la articulación en dirección trasversal, columnas tipo (CCE).

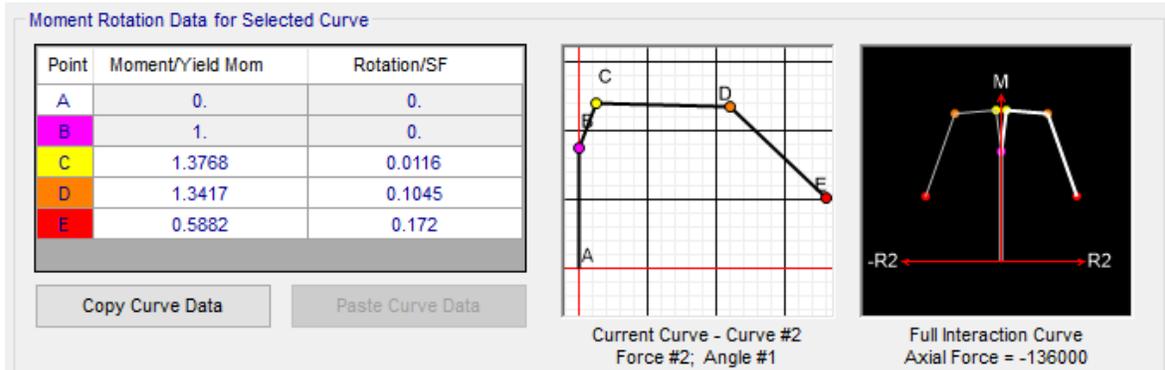


Figura 85.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CCE).

Para las columnas de esquina (CE):

Tabla 23.- CE momento - curvatura

Tipo: CE	
Momento Idealizado	
Curvature	Moment
0	0
0	502525.36
0.0131	706767
0.1109	695836
0.1948	309541

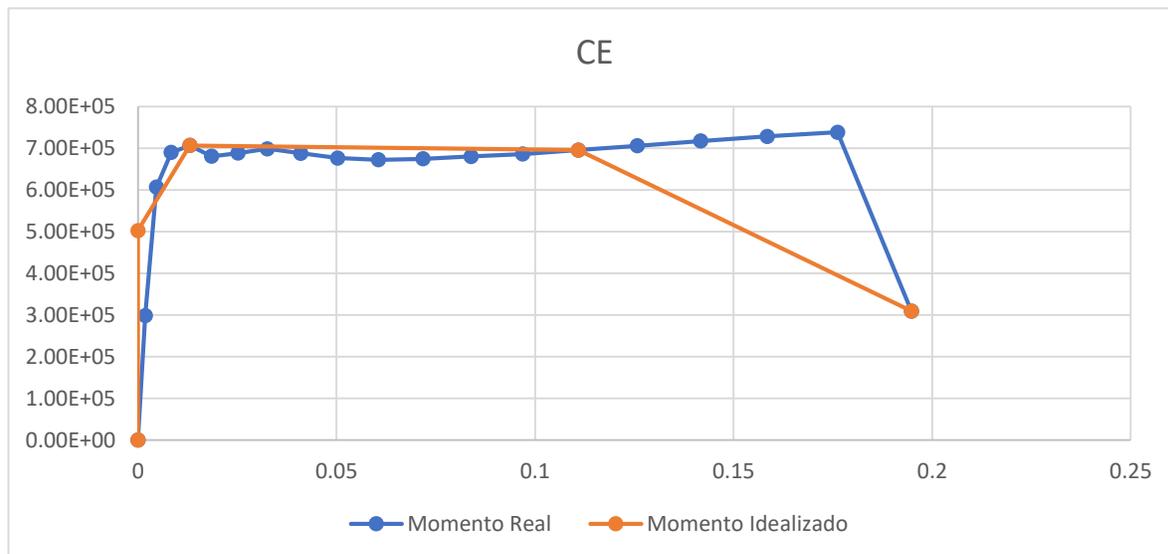


Figura 86.- Gráfica momento - curvatura



El comportamiento de las articulaciones en las direcciones transversal y longitudinal para las columnas tipo (CE) se encuentra en las figuras 69 y 70.

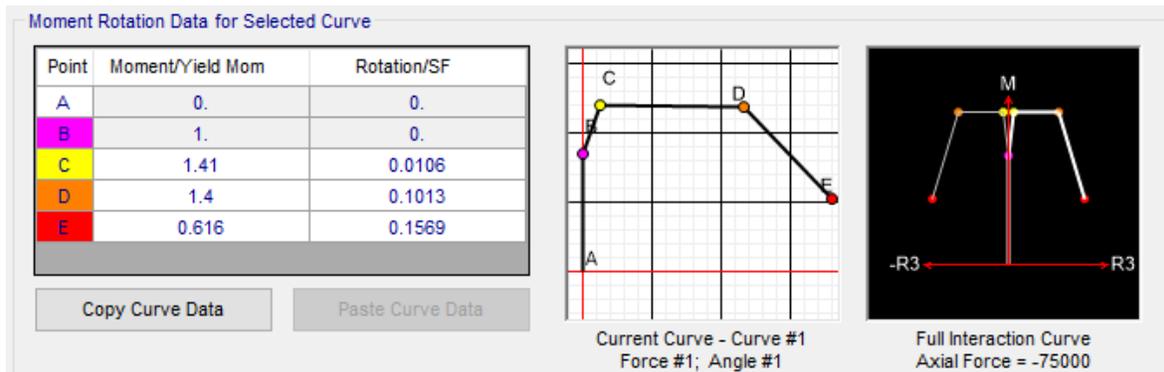


Figura 87.- Comportamiento de la articulación en dirección trasversal, columnas tipo (CE).

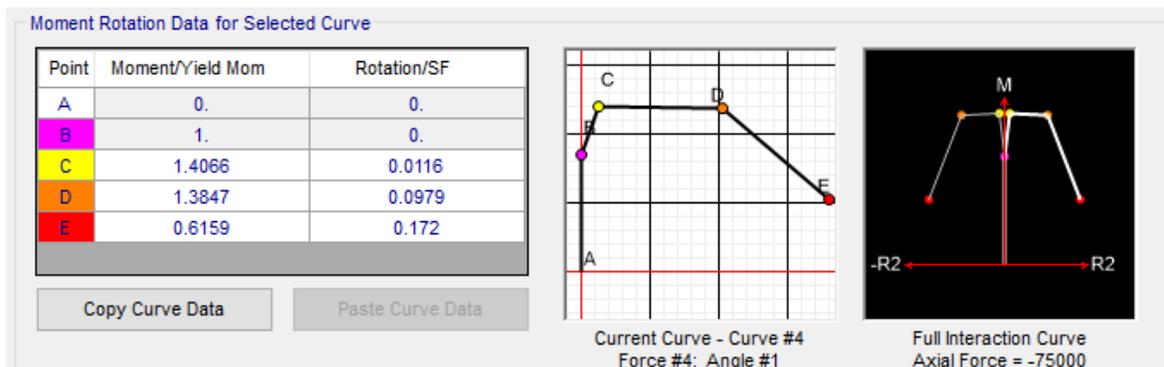


Figura 88.- Comportamiento de la articulación en dirección longitudinal, columnas tipo (CE).

Una vez definidos los comportamientos de las articulaciones plásticas, se selecciona cada columna según el tipo, y se le asigna la articulación correspondiente y se indica la longitud relativa. Para la dirección transversal, al ser curvatura doble, se asignan dos rótulas con el mismo comportamiento, y longitud relativa partiendo del extremo superior, esto es la unidad menos la longitud relativa calculada.

$$Lr_2 = 1 - 0.067m = 0.933m$$



El análisis pushover se realiza en las dos direcciones ortogonales, para cada uno de los modelos: modelo 1 (apoyos de neopreno) y modelo 2 (aisladores sísmicos con núcleo de plomo). La fuerza lateral se aplica en la parte superior de la losa, debido a que la mayor concentración de la masa del puente se encuentra en la superestructura, dándonos un centro de masas ubicado en la parte superior de las vigas tipo ASSHTO IV, por lo tanto, se opta por aplicar la carga lateral en puntos de la losa, ubicados sobre cada una de las columnas para un desplazamiento homogéneo.

5.3.- Estimación de la rigidez agrietada para los elementos tipo columna.

La rigidez agrietada en elementos estructurales de concreto armado sirve para calcular con mayor precisión la respuesta de las estructuras. Esta rigidez agrietada es considerada debido a la reducción del momento de inercia causado por la aparición de grietas (I_{cr}) que se crean en las secciones de concreto para bajos niveles de deformación.

Este momento de inercia agrietado se ingresa multiplicado por un factor al momento de inercia de la sección sin agrietamiento (I_g), tal como lo establece el ACI 318 (2005), Reglamento de Nueva Zelanda (1995) y trabajos como el de Paulay y Priestley (1992). También se puede obtener este factor conociendo la gráfica de momento – curvatura, ya que depende de los materiales, la sección, en elementos que soportan importantes cargas axiales como las columnas.

El software sap2000 nos da directamente un valor de la inercia agrietada I_{crack} obtenido de la gráfica momento – curvatura de la sección transversal. La sección transversal es circular y está reforzada simétricamente. No obstante, la carga axial en cada columna es diferente, lo que modifica valor I_{crack} . Esta información se ingresa en el sap2000 como un factor de reducción, siendo este una relación de la inercia con agrietamiento (I_{cr}) entre la inercia sin agrietar (I_g). Obteniendo así el factor de reducción de cada columna.



Tabla 24.- Factor de reducción por agrietamiento.

Tipo de columna	Momento de inercia sin agrietar (I_g)	Momento de inercia agrietado (I_{cr})	Factor de reducción
CCC	0.1005	0.065	0.64676617
CCL	0.1005	0.063	0.62686567
CCE	0.1005	0.063	0.62686567
CE	0.1005	0.061	0.60696517



Discusión de resultados

Los resultados a analizar son los obtenidos según el método Capacidad – Demanda, señalado en la norma Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council (ATC-40, 1996).

Las curvas de capacidad de los modelos, son obtenidos con los análisis estáticos no lineales realizados (pushover) (SECCIÓN 6), mientras que la curva de demanda es dada por los espectros de respuesta elásticos obtenidos (SECCIÓN 5).

La norma ATC-40 nos permite estimar gráficamente el desempeño sísmico de la estructura, al conocer el punto de intersección entre el espectro de demanda y el espectro de capacidad, para esto, debemos transformar las curvas de capacidad que se encuentran expresadas en una relación de la fuerza cortante basal y los desplazamientos producidos, (V, D), en una curva “ADRS” (Acceleration Displacement Response Spectra), al cual se le conoce como espectro de capacidad, y está graficado por una curva de pseudoaceleraciones contra desplazamiento espectral, (Sa, Sd).

Para realizar la conversión de la curva de capacidad al espectro de capacidad, es necesario convertir cada punto (V, D) en (Sa, Sd) respectivamente, esto se logra con las siguientes ecuaciones.

$$Sd = \frac{D}{(\beta * \phi)}$$

Donde:

- β = Factor de partición asociado al modo fundamental de vibrar.
- ϕ = Amplitud en el nivel n, de la forma de vibrar en el modo fundamental.
- D = Desplazamiento.

$$Sa = \frac{V}{\sigma}$$



Donde:

- σ = masa modal asociada al modo fundamental de vibrar.

De la misma manera los espectros de respuesta elásticos, formados por aceleraciones contra periodos de vibración (S_a , T) deben transformarse a un espectro de demanda (S_a , S_d), para esto, el desplazamiento espectral es,

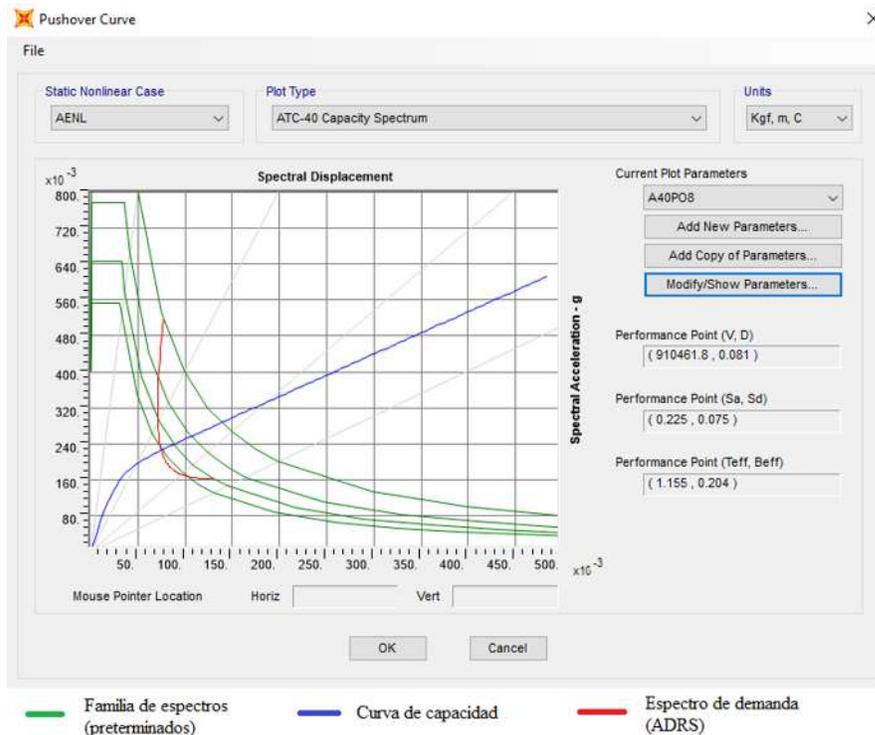
$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a * g$$

Donde:

- g = gravedad
- T = periodo de vibración
- S_a = Seudoaceleración.

Estas transformaciones las realiza el software sap2000 de manera automática.

El software sap2000 una vez que se ejecutaron los modelos los análisis necesarios, nos arroja esta información en el apartado “Display, show static pushover curve”, donde se puede seleccionar el análisis según la norma ATC-40, indicándonos los puntos de desempeño.





De esta manera se obtuvieron los puntos de desempeño para los 35 espectros elásticos de respuesta, en los dos modelos, el modelo considerando apoyos de neopreno (modelo1) y el modelo con aisladores sísmicos (modelo 2), en cada modelo se obtuvieron los puntos de desempeño para las dos direcciones ortogonales U1 (X) y U2 (Y).

La TABLA 25 muestra los puntos de desempeño del modelo con apoyos de neopreno (modelo 1) en la dirección transversal del puente (U1 O X).

La segunda columna de la tabla 25 muestra el periodo de retorno para el que fueron escalados los acelerogramas. El primer caso de cada uno de ellos corresponde al acelerograma original sin escalar (SE).

Tabla 25.- Puntos de desempeño dirección transversal, modelo 1

Registros de distancia cercana a epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento Sa, Sd)	Punto de rendimiento Teff,Beff)
AZIH8509.211	SE	1.00	1008507.50	0.08	0.253 , 0.073	1.077 , 0.05
	100.00	2.72	2742249.60	0.23	0.688 , 0.198	1.077 , 0.05
	500.00	5.29	5336790.00	0.45	1.338 , 0.385	1.077 , 0.05
	1000.00	7.00	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	8.85	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
NUX21404.182	SE	1.00	55184.90	0.00	0.014 , 0.004	1.077 , 0.05
	100.00	2.54	140180.68	0.01	0.035 , 0.01	1.077 , 0.05
	500.00	4.94	272810.64	0.02	0.068 , 0.02	1.077 , 0.05
	1000.00	6.54	361121.20	0.03	0.091 , 0.026	1.077 , 0.05
	2500.00	8.27	456325.90	0.04	0.114 , 0.033	1.077 , 0.05
PAPN8509.191	SE	1.00	433016.70	0.04	0.109 , 0.031	1.077 , 0.05
	100.00	2.75	1190406.90	0.10	0.299 , 0.086	1.077 , 0.05
	500.00	5.35	2316693.50	0.19	0.581 , 0.167	1.077 , 0.05
	1000.00	7.08	3066621.90	0.26	0.769 , 0.221	1.077 , 0.05
	2500.00	8.95	3875095.00	0.32	0.972 , 0.28	1.077 , 0.05
PAPN8802.081	SE	1.00	161196.34	0.01	0.04 , 0.012	1.077 , 0.05
	100.00	0.98	158639.91	0.01	0.04 , 0.011	1.077 , 0.05
	500.00	1.92	308734.81	0.03	0.077 , 0.022	1.077 , 0.05
	1000.00	2.54	408674.20	0.03	0.102 , 0.03	1.077 , 0.05
	2500.00	3.20	516415.60	0.04	0.129 , 0.037	1.077 , 0.05
PAPN9712.221	SE	1.00	79539.73	0.01	0.02 , 0.006	1.077 , 0.05



	100.00	1.74	138578.12	0.01	0.035 , 0.01	1.077 , 0.05
	500.00	3.39	269691.85	0.02	0.068 , 0.019	1.077 , 0.05
	1000.00	4.49	356992.80	0.03	0.09 , 0.026	1.077 , 0.05
	2500.00	5.67	451109.10	0.04	0.113 , 0.033	1.077 , 0.05
PET21404.182	SE	1.00	424034.40	0.04	0.106 , 0.031	1.077 , 0.05
	100.00	1.95	828062.70	0.07	0.208 , 0.06	1.077 , 0.05
	500.00	3.80	1611522.50	0.14	0.404 , 0.116	1.077 , 0.05
	1000.00	5.03	2133182.60	0.18	0.535 , 0.154	1.077 , 0.05
	2500.00	6.36	2695567.10	0.23	0.676 , 0.195	1.077 , 0.05
SICC7903.141	SE	1.00	877543.10	0.07	0.22 , 0.063	1.077 , 0.05
	100.00	1.39	1220934.30	0.10	0.306 , 0.088	1.077 , 0.05
	500.00	2.71	2376104.00	0.20	0.596 , 0.172	1.077 , 0.05
	1000.00	3.58	3145264.10	0.26	0.789 , 0.227	1.077 , 0.05
	2500.00	4.53	3974470.00	0.33	0.997 , 0.287	1.077 , 0.05
SICC8110.251	SE	1.00	1047118.70	0.09	0.263 , 0.076	1.077 , 0.05
	100.00	1.71	1790935.10	0.15	0.449 , 0.129	1.077 , 0.05
	500.00	3.33	3485403.00	0.29	0.874 , 0.252	1.077 , 0.05
	1000.00	4.41	4613650.00	0.39	1.157 , 0.333	1.077 , 0.05
	2500.00	5.57	5829976.00	0.49	1.462 , 0.421	1.077 , 0.05
SICM7903.141	SE	1.00	877650.70	0.07	0.22 , 0.063	1.077 , 0.05
	100.00	1.46	1280572.00	0.11	0.321 , 0.092	1.077 , 0.05
	500.00	2.84	2492167.10	0.21	0.625 , 0.18	1.077 , 0.05
	1000.00	3.76	3298897.00	0.28	0.827 , 0.238	1.077 , 0.05
	2500.00	4.75	4168607.00	0.35	1.045 , 0.301	1.077 , 0.05
SIC7903.141	SE	1.00	799510.10	0.07	0.2 , 0.058	1.077 , 0.05
	100.00	2.80	2238672.60	0.19	0.561 , 0.162	1.077 , 0.05
	500.00	5.45	4356761.00	0.37	1.092 , 0.315	1.077 , 0.05
	1000.00	7.21	5767072.00	0.48	1.446 , 0.416	1.077 , 0.05
	2500.00	9.11	N.A.		N.A.	N.A.
SICS8110.251	SE	1.00	513872.40	0.04	0.129 , 0.037	1.077 , 0.05
	100.00	3.27	1678549.00	0.14	0.421 , 0.121	1.077 , 0.05
	500.00	6.36	3266684.00	0.27	0.819 , 0.236	1.077 , 0.05
	1000.00	8.41	4324131.00	0.36	1.084 , 0.312	1.077 , 0.05
	2500.00	10.63	5464129.00	0.46	1.37 , 0.394	1.077 , 0.05
SLU21404.182	SE	1.00	38959.66	0.00	0.010 , 0.003	1.077 , 0.05
	100.00	1.02	39738.86	0.00	0.01 , 0.003	1.077 , 0.05
	500.00	1.98	77275.69	0.01	0.019 , 0.006	1.077 , 0.05
	1000.00	2.63	102290.33	0.01	0.026 , 0.007	1.077 , 0.05
	2500.00	3.32	129257.78	0.01	0.032 , 0.009	1.077 , 0.05



UNIO8509.191	SE	1.00	1876450.30	0.16	0.471 , 0.135	1.077 , 0.05
	100.00	2.58	4839850.00	0.41	1.214 , 0.349	1.077 , 0.05
	500.00	5.02	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	6.64	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	8.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
VILE8509.191	SE	1.00	664793.30	0.06	0.167 , 0.048	1.077 , 0.05
	100.00	3.44	2285403.00	0.19	0.573 , 0.165	1.077 , 0.05
	500.00	6.69	4447705.00	0.37	1.115 , 0.321	1.077 , 0.05
	1000.00	8.86	5887455.00	0.49	1.476 , 0.425	1.077 , 0.05
	2500.00	11.19	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ZACA8509.191	SE	1.00	1396936.30	0.12	0.35 , 0.101	1.077 , 0.05
	100.00	1.62	2257200.90	0.19	0.566 , 0.163	1.077 , 0.05
	500.00	3.14	4392820.00	0.37	1.102 , 0.317	1.077 , 0.05
	1000.00	4.16	5814803.00	0.49	1.458 , 0.42	1.077 , 0.05
	2500.00	5.26	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)		Punto de rendimiento (Teff,Beff)	
APAT7903	SE	1.00	409738.20	0.03	0.103 , 0.03		1.077 , 0.05	
	100.00	6.81	2752386.60	0.17	0.69 , 0.199		1.077 , 0.053	
	500.00	13.26	2115209.30	0.13	0.53 , 0.153		1.077 , 0.133	
	1000.00	17.55	1920686.00	0.12	0.482 , 0.139		1.077 , 0.176	
	2500.00	22.18	1758377.00	0.11	0.441 , 0.127		1.077 , 0.222	
APAT8110	SE	1.00	201787.21	0.01	0.051 , 0.015		1.077 , 0.222	
	100.00	4.43	893348.70	0.06	0.224 , 0.064		1.077 , 0.222	
	500.00	8.62	1738577.90	0.11	0.436 , 0.126		1.077 , 0.222	
	1000.00	11.40	3653817.00	0.23	0.916 , 0.264		1.077 , 0.05	
	2500.00	14.41	2692770.10	0.17	0.675 , 0.194		1.077 , 0.144	
APAT8509_2	SE	1.00	90961.83	0.01	0.023 , 0.006		1.077 , 0.144	
	100.00	20.79	2565445.00	0.16	0.643 , 0.185		1.077 , 0.05	
	500.00	40.45	4992705.00	0.31	1.252 , 0.36		1.077 , 0.05	
	1000.00	53.55	6601179.00	0.42	1.655 , 0.477		1.077 , 0.05	
	2500.00	67.66	N.A.	N.A.	N.A.		N.A.	
APAT8509	SE	1.00	625694.80	0.04	0.157 , 0.045		1.077 , 0.05	
	100.00	5.26	3290300.00	0.21	0.825 , 0.238		1.077 , 0.05	
	500.00	10.23	6403360.00	0.40	1.606 , 0.462		1.077 , 0.05	
	1000.00	13.55	N.A.	N.A.	N.A.		N.A.	



	2500.00	17.12	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
APAT8604	SE	1.00	510320.20	0.03	0.128 , 0.037	1.077 , 0.05
	100.00	8.15	4160250.00	0.26	1.043 , 0.3	1.077 , 0.05
	500.00	15.87	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	21.00	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	26.54	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
NITA0704	SE	1.00	840.81	0.00	0.0002 , 0.000	1.077 , 0.05
	100.00	76.34	64186.26	0.00	0.016 , 0.004	1.077 , 0.05
	500.00	148.57	124915.17	0.01	0.031 , 0.009	1.077 , 0.05
	1000.00	196.66	165351.01	0.01	0.041 , 0.012	1.077 , 0.05
	2500.00	248.50	208943.55	0.01	0.052 , 0.015	1.077 , 0.05
URU0608	SE	1.00	19440.25	0.00	0.005 , 0.001	1.077 , 0.05
	100.00	94.82	1843415.10	0.12	0.462 , 0.133	1.077 , 0.05
	500.00	184.54	3587536.00	0.23	0.9 , 0.259	1.077 , 0.05
	1000.00	244.28	4748844.00	0.30	1.191 , 0.343	1.077 , 0.05
	2500.00	308.68	6000812.00	0.38	1.505 , 0.433	1.077 , 0.05
URU0704	SE	1.00	15403.04	0.00	0.003 , 0.001	1.077 , 0.05
	100.00	157.25	2422061.60	0.15	0.607 , 0.175	1.077 , 0.05
	500.00	306.02	4713661.00	0.30	1.182 , 0.34	1.077 , 0.05
	1000.00	405.08	405.08		1.565 , 0.45	1.077 , 0.05
	2500.00	511.88	7733051.00	0.49	1.936 , 0.562	1.081 , 0.053
URU0804	SE	1.00	3251.26	0.00	0.0004 , 0.0004	1.077 , 0.05
	100.00	621.65	2021153.90	0.13	0.507 , 0.146	1.077 , 0.05
	500.00	1209.82	3933440.00	0.25	0.986 , 0.284	1.077 , 0.05
	1000.00	1601.45	5206720.00	0.33	1.306 , 0.376	1.077 , 0.05
	2500.00	2023.65	6577915.00	0.42	1.649 , 0.475	1.077 , 0.05
URU0607	SE	1.00	2675.94	0.00	0.0006 , 0.0002	1.077 , 0.05
	100.00	737.99	1974811.90	0.12	0.495 , 0.143	1.077 , 0.05
	500.00	1436.23	3843252.00	0.24	0.964 , 0.277	1.077 , 0.05
	1000.00	1901.14	5087337.00	0.32	1.276 , 0.367	1.077 , 0.05
	2500.00	2402.35	6428545.00	0.41	1.612 , 0.464	1.077 , 0.05

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)		Punto de rendimiento (Teff,Beff)	
ACA1211	SE	1.00	3163.58	0.00	0.0007 , 0.0002		1.077 , 0.05	
	100.00	533.92	1689099.40	0.14	0.424 , 0.122		1.077 , 0.05	
	500.00	1039.08	3287217.00	0.28	0.824 , 0.237		1.077 , 0.05	
	1000.00	1375.44	4351310.00	0.36	1.091 , 0.314		1.077 , 0.05	



	2500.00	1738.05	5498473.00	0.46	1.379 , 0.397	1.077 , 0.05
ACAM1112	SE	1.00	12793.97	0.00	0.003 , 0.001	1.077 , 0.05
	100.00	236.34	3023749.50	0.25	0.758 , 0.218	1.077 , 0.05
	500.00	459.95	5884627.00	0.49	1.476 , 0.425	1.077 , 0.05
	1000.00	608.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	769.36	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1213	SE	1.00	6533.85	0.00	0.001 , 0.000	1.077 , 0.05
	100.00	341.62	2232107.10	0.19	0.56 , 0.161	1.077 , 0.05
	500.00	664.84	4343984.00	0.36	1.089 , 0.314	1.077 , 0.05
	1000.00	880.06	5750159.00	0.48	1.442 , 0.415	1.077 , 0.05
	2500.00	1112.07	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1204_111	SE	1.00	9028.34	0.00	0.002, 0.000	1.077 , 0.05
	100.00	340.49	3074091.60	0.26	0.771 , 0.222	1.077 , 0.05
	500.00	662.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	877.15	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1108.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1204	SE	1.00	558.60	0.00	0.0001, 0.000	1.077 , 0.05
	100.00	1422.48	794593.80	0.07	0.199 , 0.057	1.077 , 0.05
	500.00	2768.34	1546387.50	0.13	0.388 , 0.112	1.077 , 0.05
	1000.00	3664.47	2046963.00	0.17	0.513 , 0.148	1.077 , 0.05
	2500.00	4630.56	2586616.90	0.22	0.649 , 0.187	1.077 , 0.05
ACAM1205	SE	1.00	16699.16	0.00	0.004 , 0.001	1.077 , 0.05
	100.00	364.77	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	500.00	709.89	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	939.68	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1187.42	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1304	SE	1.00	6134.71	0.00	0.001 , 0.0004	1.077 , 0.05
	100.00	363.24	2228355.10	0.19	0.559 , 0.161	1.077 , 0.05
	500.00	706.91	4336682.00	0.36	1.087 , 0.313	1.077 , 0.05
	1000.00	935.74	5740493.00	0.48	1.439 , 0.414	1.077 , 0.05
	2500.00	1182.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1404	SE	1.00	29143.56	0.00	0.007 , 0.002	1.077 , 0.05
	100.00	87.59	2552770.10	0.21	0.64 , 0.184	1.077 , 0.05
	500.00	170.47	4968037.00	0.42	1.246 , 0.359	1.077 , 0.05
	1000.00	225.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	285.14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405_101	SE	1.00	5588.43	0.00	0.003 , 0.0004	1.077 , 0.05
	100.00	544.07	3040505.70	0.25	0.762 , 0.22	1.077 , 0.05
	500.00	1058.84	5917237.00	0.50	1.484 , 0.427	1.077 , 0.05



	1000.00	1401.59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1771.10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405	SE	1.00	16699.16	0.00	0.004 , 0.001	1.077 , 0.05
	100.00	273.09	4560333.00	0.38	1.144 , 0.329	1.077 , 0.05
	500.00	531.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	703.50	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	888.97	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

La TABLA 26 muestra los puntos de desempeño del modelo con apoyos de neopreno (modelo 1) en la dirección longitudinal del puente (U2 O Y):

Tabla 26.- Puntos de desempeño dirección longitudinal, modelo 1.

Registros de distancia cercana a epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff,Beff)
AZIH8509.211	SE	1.00	962856.20	0.11	(0.224 , 0.098)	(1.327 , 0.05)
	100.00	2.72	2618118.30	0.29	(0.609 , 0.266)	(1.327 , 0.05)
	500.00	5.29	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	7.00	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	8.85	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
NUX21404.182	SE	1.00	35912.15	0.01	(0.008, 0.004)	(1.327 , 0.05)
	100.00	2.54	91224.06	0.02	(0.021 , 0.009)	(1.327 , 0.05)
	500.00	4.94	177534.40	0.03	(0.041 , 0.018)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	6.54	235003.42	0.03	(0.055 , 0.024)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	8.27	296958.87	0.04	(0.069 , 0.03)	(1.327 , 0.05)
PAPN8509.191	SE	1.00	331259.10	0.04	(0.077 , 0.034)	(1.327 , 0.05)
	100.00	2.75	910665.00	0.11	(0.212 , 0.093)	(1.327 , 0.05)
	500.00	5.35	1772277.80	0.20	(0.413 , 0.18)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	7.08	2345975.40	0.26	(0.546 , 0.239)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	8.95	2964459.80	0.33	(0.69 , 0.302)	(1.327 , 0.05)
PAPN8802.081	SE	1.00	78317.03	0.01	(0.018 , 0.008)	(0.018 , 0.008)
	100.00	0.98	77074.99	0.01	(0.018 , 0.008)	(1.327 , 0.05)
	500.00	1.92	149998.40	0.02	(0.035 , 0.015)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	2.54	198553.84	0.03	(0.046 , 0.02)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	3.20	250899.85	0.03	(0.058 , 0.026)	(1.327 , 0.05)
PAPN9712.221	SE	1.00	66007.72	0.01	(0.015 , 0.007)	(1.327 , 0.05)



	100.00	1.74	115001.98	0.02	(0.027 , 0.012)	(1.327 , 0.05)
	500.00	3.39	223809.47	0.03	(0.052 , 0.023)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	4.49	296258.02	0.04	(0.069 , 0.03)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	5.67	374362.40	0.05	(0.087 , 0.038)	(1.327 , 0.05)
PET21404.182	SE	1.00	497911.90	0.06	(0.116 , 0.051)	(1.327 , 0.05)
	100.00	1.95	972332.10	0.11	(0.226 , 0.099)	(1.327 , 0.05)
	500.00	3.80	1892290.30	0.21	(0.441 , 0.193)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	5.03	2504836.70	0.28	(0.583 , 0.255)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	6.36	3165780.00	0.35	(0.737 , 0.322)	(1.327 , 0.05)
SICC7903.141	SE	1.00	503622.30	0.06	(0.117 , 0.051)	(1.327 , 0.05)
	100.00	1.39	700694.60	0.08	(0.163 , 0.071)	(1.327 , 0.05)
	500.00	2.71	1363647.00	0.16	(0.317 , 0.139)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	3.58	1805068.20	0.21	(0.42 , 0.184)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	4.53	2280949.80	0.26	(0.531 , 0.232)	(1.327 , 0.05)
SICC8110.251	SE	1.00	833209.70	0.10	(0.194 , 0.085)	(1.327 , 0.05)
	100.00	1.71	1425076.80	0.16	(0.332 , 0.145)	(1.327 , 0.05)
	500.00	3.33	2773393.00	0.31	(0.646 , 0.282)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	4.41	3579818.00	0.40	(0.833 , 0.367)	(1.332 , 0.053)
	2500.00	5.57	4089298.00	0.48	(0.948 , 0.434)	(1.357 , 0.067)
SICM7903.141	SE	1.00	495831.30	0.06	(0.115 , 0.05)	(1.327 , 0.05)
	100.00	1.46	723462.80	0.09	(0.168 , 0.074)	(1.327 , 0.05)
	500.00	2.84	1407957.00	0.16	(0.328 , 0.143)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	3.76	1863721.60	0.21	(0.434 , 0.19)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	4.75	2355066.40	0.27	(0.548 , 0.24)	(1.327 , 0.05)
SIC7903.141	SE	1.00	473143.60	0.06	(0.11 , 0.048)	(1.327 , 0.05)
	100.00	2.80	1324802.10	0.15	(0.308 , 0.135)	(1.327 , 0.05)
	500.00	5.45	2578295.80	0.29	(0.6 , 0.262)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	7.21	3392849.00	0.38	(0.79 , 0.346)	(1.328 , 0.051)
	2500.00	9.11	3897857.00	0.45	(0.905 , 0.408)	(1.347 , 0.062)
SICS8110.251	SE	1.00	461818.30	0.06	(0.108 , 0.047)	(1.327 , 0.05)
	100.00	3.27	1508515.80	0.17	(0.351 , 0.154)	(1.327 , 0.05)
	500.00	6.36	2935776.70	0.33	(0.683 , 0.299)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	8.41	3794344.00	0.43	(0.881 , 0.394)	(1.341 , 0.058)
	2500.00	10.63	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SLU21404.182	SE	1.00	29391.44	0.01	(0.007 , 0.003)	(1.327 , 0.05)
	100.00	1.02	29979.27	0.01	(0.007 , 0.003)	(1.327 , 0.05)
	500.00	1.98	58297.32	0.01	(0.014 , 0.006)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	2.63	77168.53	0.01	(0.018 , 0.008)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	3.32	97512.96	0.02	(0.023 , 0.010)	(1.327 , 0.05)



UNIO8509.191	SE	1.00	29391.44	0.01	(0.007 , 0.003)	(1.327 , 0.05)
	100.00	2.58	75808.12	0.01	(0.018 , 0.008)	(1.327 , 0.05)
	500.00	5.02	147532.89	0.02	(0.034 , 0.015)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	6.64	195290.23	0.03	(0.045 , 0.02)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	8.40	246775.83	0.03	(0.057 , 0.025)	(1.327 , 0.05)
VILE8509.191	SE	1.00	582903.40	0.07	(0.136 , 0.059)	(1.327 , 0.05)
	100.00	3.44	2003884.80	0.23	(0.345 , 0.162)	(1.327 , 0.05)
	500.00	6.69	3720022.00	0.42	(0.865 , 0.384)	(1.337 , 0.056)
	1000.00	8.86	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	11.19	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ZACA8509.191	SE	1.00	979705.30	0.11	(0.228 , 0.1)	(0.228 , 0.1)
	100.00	1.62	1583029.80	0.18	(0.369 , 0.161)	(1.327 , 0.05)
	500.00	3.14	3080813.30	0.35	(0.717 , 0.314)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	4.16	4176303.00	0.49	(0.968 , 0.446)	(0.968 , 0.446)
	2500.00	5.26	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff,Beff)
APAT7903	SE	1.00	300378.90	0.04	(0.07 , 0.031)	(1.327 , 0.05)
	100.00	6.81	2046614.00	0.23	(0.476 , 0.208)	(1.327 , 0.05)
	500.00	13.26	3744165.00	0.43	(0.87 , 0.387)	(1.338 , 0.057)
	1000.00	17.55	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	22.18	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
APAT8110	SE	1.00	264018.68	0.04	(0.061 , 0.027)	(1.327 , 0.05)
	100.00	4.43	1168858.70	0.14	(0.272 , 0.119)	(1.327 , 0.05)
	500.00	8.62	2274757.90	0.26	(0.53 , 0.232)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	11.40	3011111.50	0.34	(0.701 , 0.306)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	14.41	3644798.00	0.41	(0.847 , 0.375)	(1.334 , 0.055)
APAT8509_2	SE	1.00	99064.98	0.02	(0.023 , 0.01)	(1.327 , 0.05)
	100.00	20.79	2059094.30	0.23	(0.479 , 0.21)	(1.327 , 0.05)
	500.00	40.45	3734507.00	0.43	(0.868 , 0.386)	(1.338 , 0.057)
	1000.00	53.55	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	67.66	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
APAT8509	SE	1.00	299640.26	0.04	(0.07 , 0.03)	(1.327 , 0.05)
	100.00	5.26	1575698.30	0.18	(0.367 , 0.16)	(1.327 , 0.05)
	500.00	10.23	3066555.10	0.34	(0.714 , 0.312)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	13.55	3782150.00	0.43	(0.879 , 0.392)	(1.34 , 0.058)



	2500.00	17.12	4252243.00	0.51	(0.985 , 0.456)	(1.365 , 0.07)
APAT8604	SE	1.00	257301.82	0.03	(0.06 , 0.026)	(1.327 , 0.05)
	100.00	8.15	2097584.70	0.24	(0.488 , 0.213)	(1.327 , 0.05)
	500.00	15.87	3784129.00	0.43	(0.879 , 0.392)	(1.341 , 0.058)
	1000.00	21.00	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	26.54	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
NITA0704	SE	1.00	541.01	0.01	(0.001 , 0.0005)	(1.327 , 0.05)
	100.00	76.34	41299.63	0.01	(0.009 , 0.004)	(1.327 , 0.05)
	500.00	148.57	80374.68	0.02	(0.019 , 0.008)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	196.66	106392.48	0.02	(0.025 , 0.011)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	248.50	134441.41	0.02	(0.031 , 0.014)	(1.327 , 0.05)
URU0608	SE	1.00	9865.15	0.01	(0.002 , 0.001)	(1.327 , 0.05)
	100.00	94.82	935459.60	0.11	(0.218 , 0.095)	(1.327 , 0.05)
	500.00	184.54	1820531.50	0.21	(0.424 , 0.185)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	244.28	2409849.20	0.27	(0.561 , 0.245)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	308.68	3045173.10	0.34	(0.709 , 0.31)	(1.327 , 0.05)
URU0704	SE	1.00	14283.74	0.01	(0.003 , 0.001)	(1.327 , 0.05)
	100.00	157.25	2246057.40	0.25	(0.523 , 0.229)	(1.327 , 0.05)
	500.00	306.02	4011930.00	0.47	(0.931 , 0.423)	(1.353 , 0.065)
	1000.00	405.08	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	511.88	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
URU0804	SE	1.00	1901.90	0.01	(0.004 , 0.0001)	(1.327 , 0.05)
	100.00	621.65	1182324.70	0.14	(0.275 , 0.12)	(1.327 , 0.05)
	500.00	1209.82	2300964.40	0.26	(0.536 , 0.234)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	1601.45	3045801.40	0.34	(0.709 , 0.31)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	2023.65	3657593.00	0.41	(0.85 , 0.376)	(1.335 , 0.055)
URU0607	SE	1.00	2353.99	0.01	(0.0004 , 0.0002)	(1.327 , 0.05)
	100.00	737.99	1737222.20	0.20	(0.404 , 0.177)	(1.327 , 0.05)
	500.00	1436.23	3371525.00	0.38	(0.785 , 0.343)	(1.327 , 0.051)
	1000.00	1901.14	4014218.00	0.47	(0.931 , 0.424)	(1.354 , 0.065)
	2500.00	2402.35	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff, Beff)
ACA1211	SE	1.00	3682.79	0.01	(0.0006 , 0.0004)	(1.327 , 0.05)
	100.00	533.92	1966315.20	0.22	(0.458 , 0.2)	(1.327 , 0.05)
	500.00	1039.08	3803305.00	0.44	(0.883 , 0.395)	(1.342 , 0.059)
	1000.00	1375.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.



	2500.00	1738.05	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1112	SE	1.00	12135.00	0.01	(0.003 , 0.001)	(1.327 , 0.05)
	100.00	236.34	2868006.60	0.32	(0.668 , 0.292)	(1.327 , 0.05)
	500.00	459.95	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	608.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	769.36	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1213	SE	1.00	6340.35	0.01	(0.001 , 0.0004)	(1.327 , 0.05)
	100.00	341.62	2166004.40	0.24	(0.504 , 0.22)	(1.327 , 0.05)
	500.00	664.84	3921384.00	0.45	(0.91 , 0.411)	(1.349 , 0.062)
	1000.00	880.06	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1112.07	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1204_111	SE	1.00	8191.43	0.01	(0.002 , 0.0004)	(1.327 , 0.05)
	100.00	340.49	2789128.50	0.31	(0.649 , 0.284)	(1.327 , 0.05)
	500.00	662.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	877.15	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1108.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1204	SE	1.00	258.98	0.01	(0.000 , 0.000)	(1.327 , 0.05)
	100.00	1422.48	368392.20	0.05	(0.086 , 0.037)	(1.327 , 0.05)
	500.00	2768.34	716941.30	0.09	(0.167 , 0.073)	(1.327 , 0.05)
	1000.00	3664.47	949019.70	0.11	(0.221 , 0.097)	(1.327 , 0.05)
	2500.00	4630.56	1199215.80	0.14	(0.279 , 0.122)	(1.327 , 0.05)
ACAM1205	SE	1.00	4897.19	0.01	(0.001,0.0005)	(1.327 , 0.05)
	100.00	364.77	1786339.50	0.20	(0.416 , 0.182)	(1.327 , 0.05)
	500.00	709.89	3447720.00	0.39	(0.802 , 0.352)	(1.329 , 0.051)
	1000.00	939.68	4095022.00	0.48	(0.949 , 0.435)	(1.358 , 0.067)
	2500.00	1187.42	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1304	SE	1.00	9507.59	0.01	(0.002 , 0.001)	(1.327 , 0.05)
	100.00	363.24	3439902.00	0.39	(0.8 , 0.351)	(1.329 , 0.051)
	500.00	706.91	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	935.74	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1182.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1404	SE	1.00	37451.51	0.01	(0.009 , 0.004)	(1.327 , 0.05)
	100.00	87.59	3280597.00	0.37	(0.764 , 0.334)	(0.764 , 0.334)
	500.00	170.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	225.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	285.14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405_101	SE	1.00	8614.53	0.01	(0.002 , 0.0009)	(1.327 , 0.05)
	100.00	544.07	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	500.00	1058.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.



	1000.00	1401.59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1771.10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405	SE	1.00	14786.55	0.01	(0.0003 , 0.001)	(0.003 , 0.001)
	100.00	273.09	3933409.00	0.46	(0.913 , 0.413)	(1.349 , 0.063)
	500.00	531.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	703.50	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	888.97	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Para los casos con aislamiento, la TABLA 27 muestra los puntos de desempeño del modelo con aisladores sísmicos con núcleo de plomo (LRB) (modelo 2) en la dirección transversal del puente (U1 o X):

Tabla 27.- Puntos de desempeño dirección transversal, modelo 2.

Registros de distancia cercana a epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff, Beff)
AZIH8509.211	SE	1.00	806518.30	0.06	0.198 , 0.051	1.016 , 0.164
	100.00	2.72	1317152.90	0.19	0.33 , 0.183	1.496 , 0.211
	500.00	5.29	1886170.40	0.35	0.474 , 0.336	1.689 , 0.175
	1000.00	7.00	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	8.85	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
NUX21404.182	SE	1.00	121091.81	0.00	0.029 , 4.339E-03	0.776 , 0.051
	100.00	2.54	287469.82	0.01	0.069 , 0.011	0.789 , 0.057
	500.00	4.94	475819.50	0.02	0.114 , 0.019	0.821 , 0.074
	1000.00	6.54	561708.40	0.03	0.136 , 0.024	0.845 , 0.087
	2500.00	8.27	628952.60	0.03	0.152 , 0.029	0.873 , 0.102
PAPN8509.191	SE	1.00	415712.60	0.02	0.1 , 0.016	0.808 , 0.068
	100.00	2.75	707329.30	0.04	0.172 , 0.036	0.92 , 0.124
	500.00	5.35	1062450.60	0.12	0.265 , 0.115	1.323 , 0.22
	1000.00	7.08	1124099.50	0.14	0.281 , 0.132	1.374 , 0.22
	2500.00	8.95	1182828.90	0.16	0.296 , 0.147	1.417 , 0.219
PAPN8802.081	SE	1.00	362839.00	0.02	0.087 , 0.014	0.799 , 0.063
	100.00	0.98	358172.90	0.02	0.086 , 0.014	0.086 , 0.014
	500.00	1.92	543907.60	0.03	0.131 , 0.023	0.84 , 0.084
	1000.00	2.54	612803.30	0.03	0.148 , 0.028	0.865 , 0.098
	2500.00	3.20	661847.20	0.04	0.161 , 0.032	0.89 , 0.11



PAPN9712.221	SE	1.00	123639.03	0.00	0.03 , 4.433E-03	0.777 , 0.051
	100.00	1.74	210873.66	0.01	0.05 , 7.677E-03	0.783 , 0.054
	500.00	3.39	382773.60	0.02	0.092 , 0.015	0.802 , 0.064
	1000.00	4.49	474759.40	0.02	0.114 , 0.019	0.821 , 0.074
	2500.00	5.67	554621.80	0.03	0.134 , 0.024	0.843 , 0.086
PET21404.182	SE	1.00	630022.80	0.03	0.153 , 0.029	0.874 , 0.102
	100.00	1.95	781487.00	0.05	0.191 , 0.046	0.987 , 0.153
	500.00	3.80	1078716.90	0.13	0.269 , 0.119	1.337 , 0.22
	1000.00	5.03	1173506.30	0.15	0.293 , 0.145	1.41 , 0.219
	2500.00	6.36	1297533.30	0.19	0.325 , 0.178	1.486 , 0.212
SICC7903.141	SE	1.00	806636.00	0.06	0.198 , 0.051	1.017 , 0.164
	100.00	1.39	850946.80	0.07	0.21 , 0.06	1.074 , 0.184
	500.00	2.71	980595.70	0.10	0.244 , 0.093	1.241 , 0.217
	1000.00	3.58	1066055.30	0.12	0.266 , 0.116	1.326 , 0.22
	2500.00	4.53	1339047.40	0.20	0.335 , 0.189	1.507 , 0.21
SICC8110.251	SE	1.00	1.51	0.21	1.507 , 0.21	1.006 , 0.161
	100.00	1.71	974795.30	0.10	0.242 , 0.092	1.234 , 0.216
	500.00	3.33	1255749.00	0.18	0.314 , 0.167	1.462 , 0.215
	1000.00	4.41	1420229.00	0.22	0.356 , 0.211	1.545 , 0.204
	2500.00	5.57	2138841.20	0.42	0.538 , 0.404	1.739 , 0.163
SICM7903.141	SE	1.00	752731.40	0.05	0.184 , 0.042	0.958 , 0.141
	100.00	1.46	835549.60	0.06	0.206 , 0.057	1.054 , 0.177
	500.00	2.84	998214.50	0.10	0.248 , 0.098	1.26 , 0.218
	1000.00	3.76	1062411.20	0.12	0.265 , 0.115	1.323 , 0.22
	Sic	2500.00	4.75	1341321.70	0.20	0.336 , 0.19
SICS7903.141	SE	1.00	1.51	0.21	1.508 , 0.21	1.508 , 0.21
	100.00	2.80	994962.90	0.10	0.247 , 0.097	1.256 , 0.218
	500.00	5.45	1483738.60	0.24	0.372 , 0.228	1.571 , 0.2
	1000.00	7.21	1795208.10	0.32	0.451 , 0.312	1.668 , 0.18
	2500.00	9.11	2085253.40	0.40	0.525 , 0.39	1.729 , 0.165
SICS8110.251	SE	1.00	720841.10	0.04	0.176 , 0.038	0.93 , 0.129
	100.00	3.27	892151.20	0.08	0.22 , 0.07	1.131 , 0.199
	500.00	6.36	1619183.70	0.28	0.407 , 0.265	1.618 , 0.191
	1000.00	8.41	1933943.00	0.36	0.486 , 0.349	1.7 , 0.173
	2500.00	10.63	2252971.30	0.45	0.567 , 0.435	1.757 , 0.158
SLU21404.182	SE	1.00	1.76	0.16	0.017 , 2.585E-03	0.775 , 0.05
	100.00	1.02	74033.60	0.00	0.018 , 2.635E-03	0.775 , 0.05
	500.00	1.98	141668.02	0.01	0.034 , 5.096E-03	0.778 , 0.052
	1000.00	2.63	185352.94	0.01	0.044 , 6.704E-03	0.781 , 0.053



	2500.00	3.32	229817.74	0.01	0.055 , 8.408E-03	0.784 , 0.055
UNIO8509.191	SE	1.00	960270.90	0.09	0.238 , 0.088	1.217 , 0.214
	100.00	2.58	2034641.00	0.39	0.512 , 0.376	1.72 , 0.168
	500.00	5.02	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	6.64	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	8.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
VILE8509.191	SE	1.00	548666.50	0.03	0.132 , 0.023	0.841 , 0.085
	100.00	3.44	1106302.00	0.13	0.276 , 0.127	1.36 , 0.22
	500.00	6.69	1713796.90	0.30	0.431 , 0.29	1.647 , 0.185
	1000.00	8.86	2136919.10	0.42	0.538 , 0.404	1.738 , 0.163
	2500.00	11.19	N.A.		N.A.	N.A.
ZACA8509.191	SE	1.00	882358.80	0.07	0.218 , 0.068	1.117 , 0.196
	100.00	1.62	1011178.10	0.11	0.251 , 0.101	1.273 , 0.219
	500.00	3.14	1473055.90	0.24	0.369 , 0.225	1.567 , 0.201
	1000.00	4.16	1609364.30	0.27	0.404 , 0.262	1.615 , 0.192
	2500.00	5.26	1820373.90	0.33	0.458 , 0.319	1.674 , 0.179

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff, Beff)
APAT7903	SE	1.00	380121.90	0.02	0.091 , 0.015	0.802 , 0.064
	100.00	6.81	1116603.60	0.14	0.279 , 0.13	1.368 , 0.22
	500.00	13.26	1524909.00	0.25	0.383 , 0.239	1.586 , 0.197
	1000.00	17.55	1776132.10	0.32	0.446 , 0.307	1.663 , 0.181
	2500.00	22.18	2041742.90	0.39	0.514 , 0.378	1.721 , 0.167
APAT8110	SE	1.00	480706.40	0.02	0.116 , 0.019	0.822 , 0.075
	100.00	4.43	913279.50	0.08	0.226 , 0.075	1.159 , 0.205
	500.00	8.62	1123826.60	0.14	0.28 , 0.132	1.374 , 0.22
	1000.00	11.40	1182049.60	0.16	0.295 , 0.147	1.416 , 0.219
	2500.00	14.41	1307851.50	0.19	0.327 , 0.181	1.491 , 0.212
APAT8509_2	SE	1.00	1.49	0.21	0.032 , 4.869E-03	0.777 , 0.051
	100.00	20.79	1118772.10	0.14	0.279 , 0.13	1.37 , 0.22
	500.00	40.45	1642941.80	0.28	0.413 , 0.271	1.626 , 0.189
	1000.00	53.55	2054152.30	0.40	0.517 , 0.381	1.724 , 0.167
	2500.00	67.66	2391494.40	0.49	0.602 , 0.472	1.776 , 0.152
APAT8509	SE	1.00	498657.20	0.02	0.12 , 0.02	0.826 , 0.077
	100.00	5.26	1026736.30	0.11	0.255 , 0.105	1.289 , 0.22
	500.00	10.23	1321387.60	0.19	0.331 , 0.185	1.498 , 0.211



	1000.00	13.55	1491696.40	0.24	0.374 , 0.23	1.574 , 0.199
	2500.00	17.12	1775649.80	0.32	0.446 , 0.307	1.663 , 0.181
APAT8604	SE	1.00	416289.80	0.02	0.1 , 0.016	0.808 , 0.068
	100.00	8.15	1110704.40	0.14	0.277 , 0.128	1.364 , 0.22
	500.00	15.87	1745289.70	0.31	0.439 , 0.298	1.655 , 0.183
	1000.00	21.00	2076927.40	0.40	0.523 , 0.388	1.728 , 0.166
	2500.00	26.54	2410624.40	0.49	0.607 , 0.477	1.779 , 0.152
	NITA0704	SE	1.00	1711.06	0.00	4.083E-04 , 6.090E-05
	100.00	76.34	128851.08	0.01	0.031 , 4.624E-03	0.777 , 0.051
	500.00	148.57	239890.80	0.01	239890.8 , 9.699E-03	0.785 , 0.055
	1000.00	196.66	305963.26	0.01	0.073 , 0.011	0.792 , 0.059
	2500.00	248.50	369627.20	0.02	0.089 , 0.014	0.8 , 0.063
URU0608	SE	1.00	28966.46	0.00	6.912E-03 , 1.031E-03	0.775 , 0.05
	100.00	94.82	918055.00	0.08	0.227 , 0.077	1.165 , 0.206
	500.00	184.54	1069606.10	0.12	0.267 , 0.117	1.329 , 0.22
	1000.00	244.28	1206525.90	0.16	0.302 , 0.154	1.432 , 0.218
	2500.00	308.68	1404910.60	0.22	0.352 , 0.207	1.538 , 0.205
URU0704	SE	1.00	28966.46	0.00	6.912E-03 , 1.031E-03	0.775 , 0.05
	100.00	157.25	1007043.30	0.11	0.25 , 0.1	1.269 , 0.219
	500.00	306.02	1341116.10	0.20	0.336 , 0.19	1.508 , 0.21
	1000.00	405.08	1754601.70	0.31	0.441 , 0.301	1.658 , 0.183
	2500.00	511.88	2357448.20	0.48	0.594 , 0.463	1.772 , 0.154
URU0804	SE	1.00	6430.33	0.00	1.534E-03 , 2.289E-04	0.775 , 0.05
	100.00	621.65	949906.70	0.09	0.236 , 0.085	1.205 , 0.213
	500.00	1209.82	1176886.40	0.15	0.294 , 0.146	1.413 , 0.219
	1000.00	1601.45	1414575.30	0.22	0.355 , 0.21	1.542 , 0.205
	2500.00	2023.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
URU0607	SE	1.00	5619.95	0.00	1.341E-03 , 2.000E-04	0.775 , 0.05
	100.00	737.99	1050970.20	0.12	0.262 , 0.112	1.312 , 0.22
	500.00	1436.23	1318321.90	0.19	0.33 , 0.184	0.33 , 0.184
	1000.00	1901.14	1650936.90	0.28	0.415 , 0.273	1.628 , 0.189
	2500.00	2402.35	2351387.00	0.48	0.592 , 0.461	1.771 , 0.154

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff, Beff)
ACA1211	SE	1.00	5808.67	0.00	1.386E-03 , 2.067E-04	0.775 , 0.05
	100.00	533.92	1158554.60	0.15	0.289 , 0.141	1.4 , 0.219
	500.00	1039.08	2371398.10	0.48	0.597 , 0.467	1.774 , 0.153



		1000.00	1375.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	1738.05	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1112	SE	1.00	22747.92	0.00	5.428E-03 , 8.096E-04	0.775 , 0.05	
		100.00	236.34	1412948.00	0.22	0.354 , 0.209	1.542 , 0.205
		500.00	459.95	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		1000.00	608.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	769.36	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1213	SE	1.00	9982.00	0.00	2.382E-03 , 3.553E-04	0.775 , 0.05	
		100.00	341.62	1168456.40	0.15	0.292 , 0.143	1.407 , 0.219
		500.00	664.84	1752970.90	0.31	0.441 , 0.301	1.657 , 0.183
		1000.00	880.06	2159977.90	0.43	0.544 , 0.41	1.742 , 0.162
		2500.00	1112.07	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1204_111	SE	1.00	14209.37	0.00	3.390E-03 , 5.057E-04	0.775 , 0.05	
		100.00	340.49	1344072.50	0.20	0.337 , 0.191	1.51 , 0.209
		500.00	662.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		1000.00	877.15	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	1108.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1204	SE	1.00	1461.51	0.00	3.487E-04 , 5.202E-05	0.775 , 0.05	
		100.00	1422.48	742479.70	0.05	0.181 , 0.041	0.949 , 0.137
		500.00	2768.34	889174.40	0.08	0.22 , 0.069	1.127 , 0.198
		1000.00	3664.47	926541.60	0.09	0.229 , 0.079	1.176 , 0.208
		2500.00	4630.56	979278.60	0.10	0.243 , 0.093	1.239 , 0.217
ACAM1205	SE	1.00	9968.97	0.00	2.379E-03 , 3.548E-04	0.775 , 0.05	
		100.00	364.77	1060473.50	0.12	0.264 , 0.115	1.321 , 0.22
		500.00	709.89	2253278.40	0.45	0.567 , 0.435	1.757 , 0.158
		1000.00	939.68	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	1187.42	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1304	SE	1.00	11162.75	0.00	2.664E-03 , 3.973E-04	0.775 , 0.05	
		100.00	363.24	1352380.40	0.20	0.339 , 0.193	1.514 , 0.209
		500.00	706.91	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		1000.00	935.74	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	1182.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1404	SE	1.00	46953.04	0.00	0.011 , 1.671E-03	0.775 , 0.05	
		100.00	87.59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		500.00	170.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		1000.00	225.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	285.14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405_101	SE	1.00	6785.24	0.00	1.619E-03 , 2.415E-04	0.775 , 0.05	
		100.00	544.07	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.



	500.00	1058.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	1401.59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1771.10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405	SE	1.00	19890.80	0.00	4.746E-03 , 7.080E-04	0.775 , 0.05
	100.00	273.09	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	500.00	531.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	703.50	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	888.97	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

La TABLA 28 muestra los puntos de desempeño del modelo con aisladores sísmicos con núcleo de plomo (LRB) (modelo 2) en la dirección longitudinal del puente (U2 o Y):

Tabla 28.- Puntos de desempeño dirección longitudinal, modelo 2.

Registros de distancia cercana a epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento Sa, Sd)	Punto de rendimiento Teff, Beff)
AZIH8509.211	SE	1.00	775814.70	0.07	(0.172 , 0.066)	(1.244 , 0.113)
	100.00	2.72	1193592.50	0.19	(0.275 , 0.179)	(1.621 , 0.18)
	500.00	5.29	1776149.00	0.36	(0.414 , 0.348)	(1.84 , 0.158)
	1000.00	7.00	1985578.70	0.44	(0.461 , 0.42)	(1.914 , 0.16)
	2500.00	8.85	2131390.50	0.50	(0.493 , 0.476)	(1.972 , 0.164)
NUX21404.182	SE	1.00	62390.35	0.00	(0.014 , 3.971E-03)	(1.085 , 0.05)
	100.00	2.54	156254.89	0.01	(0.034 , 0.01)	(1.089 , 0.051)
	500.00	4.94	293441.87	0.02	(0.064 , 0.019)	(1.098 , 0.055)
	1000.00	6.54	375259.10	0.03	(0.082 , 0.025)	(1.106 , 0.058)
	2500.00	8.27	453168.30	0.03	(0.099 , 0.031)	(1.117 , 0.062)
PAPN8509.191	SE	1.00	504484.40	0.04	(0.11 , 0.035)	(1.127 , 0.066)
	100.00	2.75	826771.30	0.08	(0.185 , 0.077)	(1.292 , 0.13)
	500.00	5.35	925573.30	0.11	(0.209 , 0.102)	(1.403 , 0.161)
	1000.00	7.08	1000062.00	0.13	(0.227 , 0.123)	(1.478 , 0.173)
	2500.00	8.95	1332103.30	0.23	(0.308 , 0.219)	(1.693 , 0.176)
PAPN8802.081	SE	1.00	177471.10	0.01	(0.039 , 0.011)	(1.09 , 0.052)
	100.00	0.98	174792.35	0.01	(0.038 , 0.011)	(1.09 , 0.052)
	500.00	1.92	323030.60	0.02	(0.07 , 0.021)	(1.1 , 0.056)
	1000.00	2.54	407308.30	0.03	(0.089 , 0.027)	(1.11 , 0.06)
	2500.00	3.20	484556.40	0.04	(0.106 , 0.033)	(1.123 , 0.065)



PAPN9712.221	SE	1.00	90902.59	0.01	(0.02 , 5.798E-03)	(1.086 , 0.05)
	100.00	1.74	157433.96	0.01	(0.034 , 0.01)	(1.089 , 0.051)
	500.00	3.39	299062.10	0.02	(0.065 , 0.02)	(1.098 , 0.055)
	1000.00	4.49	386404.00	0.03	(0.084 , 0.026)	(1.107 , 0.058)
	2500.00	5.67	471595.70	0.03	(0.103 , 0.032)	(1.12 , 0.064)
PET21404.182	SE	1.00	439119.80	0.03	(0.096 , 0.03)	(1.115 , 0.061)
	100.00	1.95	830185.60	0.08	(0.185 , 0.077)	(1.296 , 0.132)
	500.00	3.80	981149.40	0.12	(0.223 , 0.118)	(1.46 , 0.171)
	1000.00	5.03	1065586.90	0.15	(0.244 , 0.142)	(1.534 , 0.178)
	2500.00	6.36	1194726.40	0.19	(0.275 , 0.18)	(1.622 , 0.18)
SICC7903.141	SE	1.00	591275.20	0.05	(0.13 , 0.043)	(1.149 , 0.075)
	100.00	1.39	751331.20	0.07	(0.166 , 0.062)	(1.225 , 0.106)
	500.00	2.71	915033.10	0.10	(0.206 , 0.099)	(1.392 , 0.158)
	1000.00	3.58	1150774.30	0.17	(0.264 , 0.167)	(0.264 , 0.167)
	2500.00	4.53	1257515.50	0.21	(0.29 , 0.198)	(1.656 , 0.179)
SICC8110.251	SE	1.00	780958.00	0.07	(0.173 , 0.067)	(1.248 , 0.115)
	100.00	1.71	918435.50	0.11	(0.207 , 0.1)	(1.395 , 0.159)
	500.00	3.33	1169970.90	0.18	(0.269 , 0.172)	(1.607 , 0.18)
	1000.00	4.41	2057102.80	0.47	(0.477 , 0.447)	(1.944 , 0.162)
	2500.00	5.57	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SICM7903.141	SE	1.00	592204.80	0.05	(0.13 , 0.043)	(1.149 , 0.075)
	100.00	1.46	757978.60	0.07	(0.168 , 0.063)	(1.23 , 0.108)
	500.00	2.84	923970.10	0.11	(0.209 , 0.102)	(1.401 , 0.16)
	1000.00	3.76	1090701.30	0.16	(0.25 , 0.15)	(1.553 , 0.179)
	2500.00	4.75	1199056.80	0.19	(0.276 , 0.181)	(1.624 , 0.18)
SIC7903.141	SE	1.00	660446.50	0.05	(0.145 , 0.05)	(1.174 , 0.086)
	100.00	2.80	903294.10	0.10	(0.204 , 0.096)	(1.379 , 0.155)
	500.00	5.45	1377673.10	0.24	(0.319 , 0.232)	(1.713 , 0.175)
	1000.00	7.21	1560819.10	0.30	(0.363 , 0.285)	(1.779 , 0.167)
	2500.00	9.11	1730386.20	0.35	(0.403 , 0.335)	(1.828 , 0.16)
SICS8110.251	SE	1.00	466974.30	0.03	(0.102 , 0.032)	(1.119 , 0.063)
	100.00	3.27	1085675.30	0.16	(0.248 , 0.148)	(1.549 , 0.179)
	500.00	6.36	1459005.10	0.27	(0.339 , 0.256)	(1.745 , 0.171)
	1000.00	8.41	1663779.80	0.33	(0.388 , 0.315)	(1.81 , 0.162)
	2500.00	10.63	1838434.50	0.38	(0.429 , 0.367)	(1.858 , 0.157)
SLU21404.182	SE	1.00	44364.03	0.00	(9.644E-03 , 2.822E-03)	(1.085 , 0.05)
	100.00	1.02	45215.32	0.00	(9.829E-03 , 2.876E-03)	(1.085 , 0.05)
	500.00	1.98	87612.25	0.01	(0.019 , 5.587E-03)	(1.086 , 0.05)
	1000.00	2.63	115639.33	0.01	(0.025 , 7.385E-03)	(1.087 , 0.051)



	2500.00	3.32	145516.15	0.01	(0.032 , 9.318E-03)	(1.088 , 0.051)
UNIO8509.191	SE	1.00	1113197.60	0.16	(0.255 , 0.156)	(1.569 , 0.18)
	100.00	2.58	2099585.00	0.48	(0.486 , 0.464)	(1.96 , 0.164)
	500.00	5.02	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	6.64	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	8.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
VILE8509.191	SE	1.00	640711.50	0.05	(0.141 , 0.048)	(1.165 , 0.082)
	100.00	3.44	1002565.40	0.13	(0.228 , 0.124)	(1.48 , 0.173)
	500.00	6.69	1581516.70	0.30	(0.368 , 0.291)	(1.786 , 0.166)
	1000.00	8.86	1825723.80	0.38	(0.426 , 0.363)	(1.854 , 0.157)
	2500.00	11.19	1991003.80	0.44	(0.463 , 0.422)	(1.916 , 0.16)
ZACA8509.191	SE	1.00	821609.60	0.08	(0.183 , 0.075)	(1.287 , 0.129)
	100.00	1.62	976456.30	0.12	(0.222 , 0.117)	(1.456 , 0.17)
	500.00	3.14	1243364.50	0.20	(0.287 , 0.194)	(1.649 , 0.179)
	1000.00	4.16	1422668.60	0.26	(0.33 , 0.245)	(1.731 , 0.173)
	2500.00	5.26	1615712.70	0.31	(0.376 , 0.301)	(1.796 , 0.164)

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff, Beff)
APAT7903	SE	1.00	428453.70	0.03	(0.094 , 0.029)	(1.113 , 0.061)
	100.00	6.81	1038516.10	0.14	(0.237 , 0.135)	(1.512 , 0.177)
	500.00	13.26	1355635.30	0.24	(0.314 , 0.226)	(1.703 , 0.175)
	1000.00	17.55	1714631.50	0.34	(0.4 , 0.33)	(1.824 , 0.16)
	2500.00	22.18	1904091.00	0.41	(0.444 , 0.389)	(1.878 , 0.157)
APAT8110	SE	1.00	361234.30	0.03	(0.079 , 0.024)	(1.104 , 0.057)
	100.00	4.43	866572.70	0.09	(0.194 , 0.086)	(1.337 , 0.144)
	500.00	8.62	984448.60	0.13	(0.224 , 0.119)	(1.463 , 0.171)
	1000.00	11.40	1077893.70	0.15	(0.247 , 0.146)	(1.543 , 0.179)
	2500.00	14.41	1590375.00	0.31	(0.37 , 0.294)	(1.789 , 0.165)
APAT8509_2	SE	1.00	138840.92	0.01	(0.03 , 8.886E-03)	(1.088 , 0.051)
	100.00	20.79	1069836.20	0.15	(0.245 , 0.144)	(1.537 , 0.178)
	500.00	40.45	1519292.60	0.29	(0.353 , 0.273)	(1.766 , 0.169)
	1000.00	53.55	1810609.80	0.37	(0.422 , 0.359)	(1.849 , 0.157)
	2500.00	67.66	2092174.30	0.48	(0.484 , 0.461)	(1.957 , 0.163)
APAT8509	SE	1.00	534808.20	0.04	(0.117 , 0.037)	(1.133 , 0.069)
	100.00	5.26	939130.50	0.11	(0.212 , 0.106)	(1.418 , 0.164)
	500.00	10.23	1223176.10	0.20	(0.282 , 0.188)	(1.638 , 0.179)



	1000.00	13.55	1361368.10	0.24	(0.315 , 0.228)	(1.706 , 0.175)
	2500.00	17.12	2033098.40	0.46	(0.472 , 0.438)	(1.934 , 0.162)
APAT8604	SE	1.00	491458.20	0.04	(0.107 , 0.034)	(1.124 , 0.065)
	100.00	8.15	1079402.40	0.15	(0.247 , 0.146)	(1.544 , 0.179)
	500.00	15.87	1534604.30	0.29	(1534604.3 , 0.29)	(1.771 , 0.168)
	1000.00	21.00	1764961.40	0.36	(0.412 , 0.345)	(1.837 , 0.158)
	2500.00	26.54	1930980.50	0.42	(0.45 , 0.399)	(1.889 , 0.157)
	NITA0704	SE	1.00	937.37	0.00	(2.038E-04 , 5.962E-05)
100.00		76.34	71307.88	0.00	(0.016 , 4.542E-03)	(1.086 , 0.05)
500.00		148.57	136837.01	0.01	(0.03 , 8.756E-03)	(0.03 , 8.756E-03)
1000.00		196.66	179273.78	0.01	(0.039 , 0.012)	(1.09 , 0.052)
2500.00		248.50	223303.06	0.02	(0.049 , 0.014)	(1.092 , 0.053)
URU0608	SE	1.00	22040.41	0.00	(4.791E-03 , 1.402E-03)	(1.085 , 0.05)
	100.00	94.82	811176.20	0.08	(0.181 , 0.073)	(1.276 , 0.125)
	500.00	184.54	1001936.90	0.13	(0.228 , 0.124)	(1.48 , 0.173)
	1000.00	244.28	1212217.50	0.19	(0.279 , 0.185)	(1.632 , 0.18)
	2500.00	308.68	1347313.60	0.23	(0.312 , 0.224)	(1.7 , 0.176)
URU0704	SE	1.00	17433.82	0.00	(3.790E-03 , 1.109E-03)	(1.085 , 0.05)
	100.00	157.25	1141587.30	0.17	(0.262 , 0.164)	(1.588 , 0.18)
	500.00	306.02	1436870.20	0.26	(0.333 , 0.25)	(1.736 , 0.172)
	1000.00	405.08	1773198.80	0.36	(0.414 , 0.347)	(1.839 , 0.158)
	2500.00	511.88	N.A.		N.A.	N.A.
URU0804	SE	1.00	3795.22	0.00	(8.250E-04 , 2.414E-04)	(1.085 , 0.05)
	100.00	621.65	868426.90	0.09	(0.195 , 0.087)	(1.339 , 0.145)
	500.00	1209.82	1116690.90	0.16	(0.256 , 0.157)	(1.572 , 0.18)
	1000.00	1601.45	1383858.80	0.24	(0.321 , 0.234)	(1.715 , 0.174)
	2500.00	2023.65	1625999.00	0.32	(0.379 , 0.304)	(1.799 , 0.164)
URU0607	SE	1.00	3184.86	0.00	(6.923E-04 , 2.026E-04)	(1.085 , 0.05)
	100.00	737.99	934016.00	0.11	(0.211 , 0.105)	(1.412 , 0.163)
	500.00	1436.23	1509273.40	0.28	(0.351 , 0.271)	(1.763 , 0.169)
	1000.00	1901.14	1674235.70	0.33	(0.39 , 0.318)	(1.813 , 0.162)
	2500.00	2402.35	1925856.90	0.41	(0.449 , 0.397)	(1.887 , 0.157)

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)		Punto de rendimiento (Teff, Beff)	
ACA1211	SE	1.00	3585.02	0.00	(7.793E-04 , 2.280E-04)		(1.085 , 0.05)	
	100.00	533.92	1351674.00	0.24	(0.313 , 0.225)		(1.702 , 0.176)	
	500.00	1039.08	N.A.	N.A.	N.A.		N.A.	



		1000.00	1375.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
		2500.00	1738.05	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1112	SE	1.00	14883.74	0.00	(3.235E-03 , 9.467E-04)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	236.34	1617633.80	0.31	(0.377 , 0.302)	(1.797 , 0.164)	
	500.00	459.95	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1000.00	608.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2500.00	769.36	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
ACAM1213	SE	1.00	7526.63	0.00	(1.636E-03 , 4.787E-04)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	341.62	1107596.20	0.16	(0.254 , 0.154)	(1.565 , 0.18)	
	500.00	664.84	1615923.40	0.31	(0.376 , 0.301)	(1.796 , 0.164)	
	1000.00	880.06	1894102.70	0.40	(0.441 , 0.386)	(0.441 , 0.386)	
	2500.00	1112.07	2064400.60	0.47	(0.478 , 0.45)	(1.947 , 0.163)	
ACAM1204_111	SE	1.00	10134.69	0.00	(2.203E-03 , 6.446E-04)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	340.49	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	500.00	662.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1000.00	877.15	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2500.00	1108.40	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
ACAM1204	SE	1.00	631.64	0.00	(1.373E-04 , 4.017E-05)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	1422.48	614190.50	0.05	(0.135 , 0.045)	(1.156 , 0.078)	
	500.00	2768.34	784550.10	0.07	(0.174 , 0.068)	(1.251 , 0.116)	
	1000.00	3664.47	833453.30	0.08	(0.186 , 0.078)	(1.3 , 0.133)	
	2500.00	4630.56	869099.40	0.09	(0.195 , 0.087)	(1.339 , 0.145)	
ACAM1205	SE	1.00	5541.44	0.00	(1.205E-03 , 3.525E-04)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	364.77	1288299.80	0.22	(0.298 , 0.207)	(1.672 , 0.178)	
	500.00	709.89	2062535.70	0.47	(0.478 , 0.45)	(1.946 , 0.163)	
	1000.00	939.68	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2500.00	1187.42	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
ACAM1304	SE	1.00	7323.85	0.00	(1.592E-03 , 4.658E-04)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	363.24	1243872.30	0.20	(0.287 , 0.194)	(1.649 , 0.179)	
	500.00	706.91	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1000.00	935.74	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2500.00	1182.44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
ACAM1404	SE	1.00	33958.97	0.00	(7.382E-03 , 2.160E-03)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	87.59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	500.00	170.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	1000.00	225.65	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
	2500.00	285.14	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
ACAM1405_101	SE	1.00	6608.70	0.00	(1.437E-03 , 4.203E-04)	(1.085 , 0.05)	
	100.00	544.07	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	



	500.00	1058.84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	1401.59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	1771.10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
ACAM1405	SE	1.00	18700.11	0.00	(4.065E-03 , 1.189E-03)	(1.085 , 0.05)
	100.00	273.09	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	500.00	531.47	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	1000.00	703.50	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	2500.00	888.97	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Una vez obtenidos estos resultados se calculan los promedios de los puntos de desempeño en la relación contante basal vs desplazamiento en el punto objetivo (V, D) y se encuentra el desplazamiento que se produce en las columnas para cada uno de los promedios de desempeño (TABLAS 29 A 32).

Tabla 29.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 1 dirección transversal.

Dirección transversal (U1 o X) del puente, modelo 1.

Distancia Cercana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	683620.942	0.05709607	0.006	0.001
Tr=100 (V,D)	1521998.24	0.12728627	0.013	0.00216667
Tr=500 (V,D)	2500797.36	0.20945971	0.0216	0.0036
Tr=1000 (V,D)	3021550.39	0.25288685	0.0258	0.0043
Tr=2500 (V,D)	2756095.25	0.2307	0.0235	0.00391667
Distancia media al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	188011.353	0.01180366	0.0013	0.00021667
Tr=100 (V,D)	2198735.91	0.1383991	0.0141	0.00235
Tr=500 (V,D)	3494739.6	0.21997967	0.0223	0.00371667
Tr=1000 (V,D)	3423042.39	0.24628571	0.0251	0.00418333
Tr=2500 (V,D)	4485773.38	0.28342857	0.029	0.00483333
Distancia lejana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	10634.3366	0.00085885	0.001	0.00016667
Tr=100 (V,D)	2577289.48	0.21555556	0.0219	0.00365
Tr=500 (V,D)	4326310.21	0.36185714	0.0368	0.00613333
Tr=1000 (V,D)	4472231.25	0.374	0.0379	0.00631667

*



Tr=2500 (V,D)	4042544.95	0.338	0.0344	0.00573333	*
---------------	------------	-------	--------	------------	---

Tabla 30.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 1 dirección longitudinal.

Dirección longitudinal (U2 o Y) del puente, modelo 1.

Distancia Cercana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura	
Promedio	V	D			
Tr= SE (V,D)	424085.392	0.05251153	0.0183	0.00305	
Tr=100 (V,D)	943978.034	0.10973667	0.0412	0.00686667	
Tr=500 (V,D)	1591546.1	0.1815	0.0703	0.01171667	
Tr=1000 (V,D)	1881937.69	0.21630769	0.084	0.014	
Tr=2500 (V,D)	1819992.81	0.20954545	0.081	0.0135	*
Distancia media al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura	
Promedio	V	D			
Tr= SE (V,D)	124935.044	0.0195921	0.0046	0.00076667	
Tr=100 (V,D)	1509021.35	0.172	0.0657	0.01095	
Tr=500 (V,D)	2818943.96	0.3211	0.1253	0.02088333	
Tr=1000 (V,D)	2728253.76	0.31133333	0.1207	0.02011667	*
Tr=2500 (V,D)	2946849.7	0.3388	0.1314	0.0219	
Distancia lejana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura	
Promedio	V	D			
Tr= SE (V,D)	10586.5902	0.0069127	0.0031	0.00051667	
Tr=100 (V,D)	2510899.38	0.28433333	0.11	0.01833333	
Tr=500 (V,D)	2972337.58	0.3405	0.1329	0.02215	
Tr=1000 (V,D)	2522020.85	0.2955	0.1146	0.0191	*
Tr=2500 (V,D)	1199215.8	0.138	0.0519	0.00865	*



Tabla 31.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 2 dirección transversal.

Dirección transversal (U1 o X) del puente, modelo 2.

Distancia Cercana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	475422.2008	0.06970667	0.008	0.00133333
Tr=100 (V,D)	829136.4056	0.0905542	0.0088	0.00146667
Tr=500 (V,D)	1078274.351	0.14975636	0.0107	0.00178333
Tr=1000 (V,D)	1165873.834	0.170875	0.0113	0.00188333
Tr=2500 (V,D)	1294450.87	0.20377233	0.0125	0.00208333
Distancia media al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	184747.1063	0.02934952	0.006	0.001
Tr=100 (V,D)	934092.218	0.1008065	0.009	0.0015
Tr=500 (V,D)	1250417.6	0.1854699	0.009	0.0015
Tr=1000 (V,D)	1491356.086	0.2503	0.014	0.00233333
Tr=2500 (V,D)	1823415.111	0.34155556	0.017	0.00283333
Distancia lejana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	14897.0262	0.000521	0.0017	0.00028333
Tr=100 (V,D)	1177052.157	0.15542857	0.0108	0.0018
Tr=500 (V,D)	1816705.45	0.3305	0.0166	0.00276667
Tr=1000 (V,D)	1543259.75	0.255	0.0142	0.00236667
Tr=2500 (V,D)	979278.6	0.099	0.009	0.0015

*
*



Tabla 32.- Promedios de puntos de desempeño, modelo 2 dirección longitudinal.

Dirección longitudinal (U2 o Y) del puente, modelo 2.

Distancia Cercana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	517461.6311	0.0466446	0.0229	0.00381667
Tr=100 (V,D)	791971.1543	0.10738887	0.0355	0.00591667
Tr=500 (V,D)	954039.4301	0.14762043	0.0404	0.00673333
Tr=1000 (V,D)	1150529.145	0.20432693	0.0478	0.00796667
Tr=2500 (V,D)	1218858.942	0.22343162	0.0503	0.00838333
Distancia media al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	200218.6997	0.01403672	0.0083	0.00138333
Tr=100 (V,D)	881997.2175	0.1100587	0.036	0.006
Tr=500 (V,D)	1181876.531	0.1977021	0.0473	0.00788333
Tr=1000 (V,D)	1395224.908	0.2608	0.0552	0.0092
Tr=2500 (V,D)	1630354.64	0.338	0.065	0.01083333
Distancia lejana al epicentro			Desplazamiento en columna	Curvatura
Promedio	V	D		
Tr= SE (V,D)	10889.4785	0.00053637	0.002	0.00033333
Tr=100 (V,D)	1203877.767	0.196	0.0468	0.0078
Tr=500 (V,D)	1487669.733	0.28466667	0.0576	0.0096
Tr=1000 (V,D)	1363778	0.2415	0.0527	0.00878333
Tr=2500 (V,D)	1466750	0.2805	0.0581	0.00968333

*

Ya que la rigidez de los apoyos de neopreno es inferior a la rigidez de las columnas, las cargas laterales deforman mayormente los apoyos, lo que genera la falla en los apoyos antes de alcanzar la capacidad máxima de las columnas. Para conocer la capacidad a deformaciones laterales de las columnas, se realiza un tercer análisis en el modelo 1, con el cambio de ubicación de la aplicación de la carga lateral, colocándola en el extremo superior de las columnas (TABLA 33), así las cargas horizontales mostrarán la curva de capacidad de las columnas.



Tabla 33.- Puntos de desempeño de las columnas

Registros de distancia cercana a epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento Sa, Sd)	Punto de rendimiento Teff,Beff)
			V	D		
AZIH8509.211	SE	1.00	1663713.30	0.02	(0.409 , 0.095)	(0.966 , 0.05)
	100.00	2.72	4525300.00	0.05	(1.111 , 0.258)	(0.966 , 0.05)
	500.00	5.29	8512709.00	0.10	(2.088 , 0.488)	(0.97 , 0.053)
	1000.00	7.00	10610090.00	0.14	(2.593 , 0.618)	(0.98 , 0.059)
	2500.00	8.85	12908385.00	0.20	(3.138 , 0.772)	(0.995 , 0.067)
NUX21404.182	SE	1.00	72625.63	0.00	(0.018 , 4.134E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	2.54	184469.10	0.00	(0.045 , 0.01)	(0.966 , 0.05)
	500.00	4.94	358770.60	0.00	(0.088 , 0.02)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	6.54	475988.40	0.01	(0.117 , 0.027)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	8.27	600614.00	0.01	(0.148 , 0.034)	(0.966 , 0.05)
PAPN8509.191	SE	1.00	303095.26	0.00	(0.074 , 0.017)	(0.966 , 0.05)
	100.00	2.75	833512.00	0.01	(0.205 , 0.047)	(0.966 , 0.05)
	500.00	5.35	1621559.70	0.02	(0.398 , 0.092)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	7.08	2145914.50	0.02	(0.527 , 0.122)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	8.95	2712702.60	0.03	(0.666 , 0.154)	(0.966 , 0.05)
PAPN8802.081	SE	1.00	214911.64	0.00	(0.053 , 0.012)	(0.966 , 0.05)
	100.00	0.98	210613.40	0.00	(0.052 , 0.012)	(0.966 , 0.05)
	500.00	1.92	410481.20	0.00	(0.101 , 0.023)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	2.54	543726.40	0.01	(0.134 , 0.031)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	3.20	687717.20	0.01	(0.169 , 0.039)	(0.966 , 0.05)
PAPN9712.221	SE	1.00	84340.97	0.00	(0.021 , 4.800E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1.74	146753.28	0.00	(0.036 , 8.353E-03)	(0.966 , 0.05)
	500.00	3.39	286759.29	0.00	(0.07 , 0.016)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	4.49	378690.90	0.00	(0.093 , 0.022)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	5.67	478213.30	0.01	(0.117 , 0.027)	(0.966 , 0.05)
PET21404.182	SE	1.00	561924.70	0.01	(0.138 , 0.032)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1.95	1095753.20	0.01	(0.269 , 0.062)	(0.966 , 0.05)
	500.00	3.80	2135313.80	0.02	(0.524 , 0.122)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	5.03	2826481.20	0.03	(0.694 , 0.161)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	6.36	3573841.00	0.04	(0.878 , 0.203)	(0.966 , 0.05)
SICC7903.141	SE	1.00	1235399.70	0.01	(0.303 , 0.07)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1.39	1717205.50	0.02	(0.422 , 0.098)	(0.966 , 0.05)
	500.00	2.71	3347933.00	0.04	(0.822 , 0.191)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	3.58	4422731.00	0.05	(1.086 , 0.252)	(0.966 , 0.05)



	2500.00	4.53	3125561.10	0.03	(0.768 , 0.178)	(0.966 , 0.05)
SICC8110.251	SE	1.00	1143733.00	0.01	(0.281 , 0.065)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1.71	1955783.40	0.02	(0.48 , 0.111)	(0.966 , 0.05)
	500.00	3.33	3808631.00	0.04	(0.935 , 0.217)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	4.41	5043862.00	0.06	(1.239 , 0.287)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	5.57	6370593.00	0.07	(1.565 , 0.363)	(0.966 , 0.05)
SICM7903.141	SE	1.00	1168375.70	0.01	(0.287 , 0.067)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1.46	1705828.50	0.02	(0.419 , 0.097)	(0.966 , 0.05)
	500.00	2.84	3318187.00	0.04	(0.815 , 0.189)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	3.76	4393093.00	0.05	(1.079 , 0.25)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	4.75	5549785.00	0.06	(1.363 , 0.316)	(0.966 , 0.05)
SIC7903.141	SE	1.00	1012065.40	0.01	(0.249 , 0.058)	(0.966 , 0.05)
	100.00	2.80	2833783.00	0.03	(0.696 , 0.161)	(0.966 , 0.05)
	500.00	5.45	5515756.00	0.06	(1.355 , 0.314)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	7.21	7292595.00	0.08	(1.791 , 0.415)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	9.11	9013682.00	0.11	(2.208 , 0.519)	(0.973 , 0.055)
SICS8110.251	SE	1.00	794223.20	0.01	(0.195 , 0.045)	(0.966 , 0.05)
	100.00	3.27	2589167.50	0.03	(0.636 , 0.147)	(0.966 , 0.05)
	500.00	6.36	5051259.00	0.06	(1.241 , 0.288)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	8.41	6679417.00	0.07	(1.64 , 0.38)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	10.63	8193901.00	0.09	(2.01 , 0.469)	(0.969 , 0.052)
SLU21404.182	SE	1.00	45766.46	0.00	(0.011 , 2.605E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1.02	46681.78	0.00	(0.011 , 2.657E-03)	(0.966 , 0.05)
	500.00	1.98	90617.58	0.00	(0.022 , 5.158E-03)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	2.63	119908.11	0.00	(0.029 , 6.825E-03)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	3.32	151944.63	0.00	(0.037 , 8.648E-03)	(0.966 , 0.05)
UNIO8509.191	SE	1.00	1523072.80	0.02	(0.374 , 0.087)	(0.966 , 0.05)
	100.00	2.58	3929528.00	0.04	(0.965 , 0.224)	(0.966 , 0.05)
	500.00	5.02	7619244.00	0.09	(1.87 , 0.435)	(0.967 , 0.051)
	1000.00	6.64	9888504.00	0.13	(2.419 , 0.573)	(0.977 , 0.057)
	2500.00	8.40	12313229.00	0.18	(2.999 , 0.73)	(0.99 , 0.064)
VILE8509.191	SE	1.00	663181.80	0.01	(0.163 , 0.038)	(0.966 , 0.05)
	100.00	3.44	2281345.40	0.03	(0.56 , 0.13)	(0.966 , 0.05)
	500.00	6.69	4443318.00	0.05	(1.091 , 0.253)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	8.86	5869159.00	0.06	(1.441 , 0.334)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	11.19	4693090.00	0.05	(1.153 , 0.267)	(0.966 , 0.112)
ZACA8509.191	SE	1.00	1330336.40	0.02	(0.327 , 0.076)	(0.966 , 0.112)
	100.00	1.62	2141841.60	0.02	(0.526 , 0.122)	(0.966 , 0.112)
	500.00	3.14	4182578.00	0.05	(1.027 , 0.238)	(0.966 , 0.112)



1000.00	4.16	5534199.00	0.06	(1.359 , 0.315)	(0.966 , 0.112)
2500.00	5.26	6997570.00	0.08	(1.719 , 0.398)	(0.966 , 0.112)

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V , D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff,Beff)
APAT7903	SE	1.00	384945.50	0.00	(0.095 , 0.022)	(0.966 , 0.112)
	100.00	6.81	2621479.10	0.03	(0.644 , 0.149)	(0.966 , 0.112)
	500.00	13.26	5104378.00	0.06	(1.254 , 0.291)	(0.966 , 0.112)
	1000.00	17.55	8336697.00	0.10	(2.045 , 0.477)	(0.969 , 0.053)
	2500.00	22.18	10095765.00	0.13	(2.469 , 0.586)	(0.978 , 0.058)
APAT8110	SE	1.00	431581.00	0.00	(0.106 , 0.025)	(0.966 , 0.05)
	100.00	4.43	1911903.80	0.02	(0.47 , 0.109)	(0.966 , 0.05)
	500.00	8.62	3720228.00	0.04	(0.634 , 0.153)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	11.40	4920023.00	0.05	(1.208 , 0.28)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	14.41	6085292.00	0.07	(1.494 , 0.346)	(0.966 , 0.05)
APAT8509_2	SE	1.00	141800.83	0.00	(0.035 , 8.071E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	20.79	2946621.20	0.03	(0.724 , 0.168)	(0.966 , 0.05)
	500.00	40.45	5735844.00	0.06	(1.409 , 0.326)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	53.55	7560491.00	0.08	(1.856 , 0.431)	(0.967 , 0.051)
	2500.00	67.66	9327693.00	0.11	(2.284 , 0.539)	(0.974 , 0.056)
APAT8509	SE	1.00	635870.80	0.01	(0.156 , 0.036)	(0.966 , 0.05)
	100.00	5.26	3344680.00	0.04	(0.821 , 0.19)	(0.966 , 0.05)
	500.00	10.23	6504958.00	0.07	(1.598 , 0.37)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	13.55	8483553.00	0.10	(2.081 , 0.486)	(0.97 , 0.053)
	2500.00	17.12	10412669.00	0.14	(2.545 , 0.606)	(0.979 , 0.059)
APAT8604	SE	1.00	490818.20	0.01	(0.121 , 0.028)	(0.966 , 0.05)
	100.00	8.15	4000168.00	0.04	(0.982 , 0.228)	(0.966 , 0.05)
	500.00	15.87	7726043.00	0.09	(1.896 , 0.441)	(0.968 , 0.051)
	1000.00	21.00	9881204.00	0.12	(2.417 , 0.573)	(0.977 , 0.057)
	2500.00	26.54	12090395.00	0.17	(2.946 , 0.715)	(0.988 , 0.063)
NITA0704	SE	1.00	993.56	0.00	(0.001,0.000)	(0.966 , 0.05)
	100.00	76.34	75808.24	0.00	(0.019 , 0.004)	(0.019 , 0.004)
	500.00	148.57	147642.27	0.00	(0.036 , 8.403E-03)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	196.66	195332.90	0.00	(0.048 , 0.011)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	248.50	147542.91	0.00	(0.036 , 8.398E-03)	(0.966 , 0.05)
URU0608	SE	1.00	23618.73	0.00	(5.800E-03 , 0.001)	(0.966 , 0.05)
	100.00	94.82	2239527.70	0.03	(0.55 , 0.127)	(0.966 , 0.05)



	500.00	184.54	4345846.00	0.05	(1.067 , 0.247)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	244.28	5762969.00	0.06	(1.415 , 0.328)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	308.68	7288521.00	0.08	(1.79 , 0.415)	(0.966 , 0.05)
URU0704	SE	1.00	24451.06	0.00	(0.006 , 1.392E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	157.25	3838816.00	0.04	(0.943 , 0.218)	(0.966 , 0.05)
	500.00	306.02	7435296.00	0.08	(1.826 , 0.424)	(0.967 , 0.051)
	1000.00	405.08	9244735.00	0.11	(2.264 , 0.533)	(0.974 , 0.056)
	2500.00	511.88	11047879.00	0.15	(2.698 , 0.646)	(0.982 , 0.06)
URU0804	SE	1.00	4570.66	0.00	(0.001 , 2.602E-04)	(0.966 , 0.05)
	100.00	621.65	2838382.50	0.03	(0.697 , 0.162)	(0.697 , 0.162)
	500.00	1209.82	5525933.00	0.06	(1.357 , 0.315)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	1601.45	7303649.00	0.08	(7303649. , 0.08)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	2023.65	8781747.00	0.10	(2.152 , 0.505)	(0.971 , 0.054)
URU0607	SE	1.00	3154.81	0.00	(0.001 , 0.000)	(0.966 , 0.05)
	100.00	737.99	2328247.50	0.03	(0.572 , 0.133)	(0.966 , 0.05)
	500.00	1436.23	4530303.00	0.05	(1.113 , 0.258)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	1901.14	5997288.00	0.07	(1.473 , 0.341)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	2402.35	6315924.00	0.07	(1.551 , 0.359)	(0.966 , 0.05)

Registros de distancia media al epicentro

Nombre del archivo	Tr	Factor Tr	Punto de rendimiento (V, D)		Punto de rendimiento (Sa, Sd)	Punto de rendimiento (Teff, Beff)
ACA1211	SE	1.00	3681.91	0.00	(0001 , 0.000)	(0.966 , 0.05)
	100.00	533.92	1962457.00	0.02	(0.482 , 0.112)	(0.966 , 0.05)
	500.00	1039.08	3825502.00	0.04	(0.94 , 0.218)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	1375.44	5062624.00	0.06	(1.243 , 0.288)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	1738.05	6399156.00	0.07	(6399156. , 0.07)	(0.966 , 0.05)
ACAM1112	SE	1.00	12385.94	0.00	(0.003 , 7.050E-04)	(0.966 , 0.05)
	100.00	236.34	2923082.00	0.03	(2923082. , 0.032)	(0.966 , 0.05)
	500.00	459.95	5697533.00	0.06	(1.399 , 0.324)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	608.84	7481147.00	0.08	(1.837 , 0.426)	(0.967 , 0.051)
	2500.00	769.36	9081386.00	0.11	(2.225 , 0.523)	(0.973 , 0.055)
ACAM1213	SE	1.00	7201.64	0.00	(0.002 , 4.099E-04)	(0.966 , 0.05)
	100.00	341.62	2462960.20	0.03	(0.605 , 0.14)	(0.966 , 0.05)
	500.00	664.84	4789089.00	0.05	(1.176 , 0.273)	(1.176 , 0.273)
	1000.00	880.06	6337442.00	0.07	(1.556 , 0.361)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	1112.07	7918967.00	0.09	(1.943 , 0.452)	(0.968 , 0.052)
ACAM1204_111	SE	1.00	9303.51	0.00	(0.002 , 5.295E-04)	(0.966 , 0.05)



	100.00	340.49	3163192.00	0.04	(0.777 , 0.18)	(0.966 , 0.05)
	500.00	662.65	6158921.00	0.07	(1.513 , 0.351)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	877.15	7997104.00	0.09	(1.962 , 0.457)	(0.968 , 0.052)
	2500.00	1108.40	9645669.00	0.12	(2.36 , 0.558)	(0.976 , 0.057)
ACAM1204	SE	1.00	661.46	0.00	(0.001 , 3.765E-05)	(0.966 , 0.05)
	100.00	1422.48	940593.70	0.01	(0.231 , 0.054)	(0.966 , 0.05)
	500.00	2768.34	1830916.50	0.02	(0.45 , 0.104)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	3664.47	2423583.20	0.03	(0.595 , 0.138)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	4630.56	3062551.90	0.03	(0.752 , 0.174)	(0.966 , 0.05)
ACAM1205	SE	1.00	6563.27	0.00	(0.002 , 3.736E-04)	(0.966 , 0.05)
	100.00	364.77	2389030.10	0.03	(0.587 , 0.136)	(0.966 , 0.05)
	500.00	709.89	4653358.00	0.05	(1.143 , 0.265)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	939.68	6162910.00	0.07	(1.514 , 0.351)	(0.966 , 0.05)
	2500.00	1187.42	7738444.00	0.09	(1.899 , 0.442)	(0.968 , 0.051)
ACAM1304	SE	1.00	8594.39	0.00	(0.002 , 4.892E-04)	(0.966 , 0.05)
	100.00	363.24	3119762.60	0.03	(0.766 , 0.178)	(0.966 , 0.05)
	500.00	706.91	6076232.00	0.07	(1.492 , 0.346)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	935.74	7934091.00	0.09	(1.947 , 0.453)	(0.968 , 0.052)
	2500.00	1182.44	9640587.00	0.12	(2.359 , 0.558)	(0.976 , 0.057)
ACAM1404	SE	1.00	44089.33	0.00	(0.011 , 2.509E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	87.59	3835772.00	0.04	(0.942 , 0.218)	(0.966 , 0.05)
	500.00	170.47	7450203.00	0.08	(1.829 , 0.425)	(0.967 , 0.051)
	1000.00	225.65	9321887.00	0.11	(2.282 , 0.538)	(0.974 , 0.056)
	2500.00	285.14	11252798.00	0.15	(2.747 , 0.659)	(0.983 , 0.06)
ACAM1405_101	SE	1.00	6740.52	0.00	(0.002 , 3.837E-04)	(0.966 , 0.05)
	100.00	544.07	3666843.00	0.04	(0.901 , 0.209)	(0.966 , 0.05)
	500.00	1058.84	7144951.00	0.08	(1.755 , 0.407)	(0.966 , 0.05)
	1000.00	1401.59	8959572.00	0.11	(2.195 , 0.516)	(2.195 , 0.516)
	2500.00	1771.10	10413618.00	0.14	(2.545 , 0.606)	(0.979 , 0.059)
ACAM1405	SE	1.00	22602.31	0.00	(0.005 , 1.286E-03)	(0.966 , 0.05)
	100.00	273.09	6170432.00	0.07	(1.515 , 0.351)	(0.966 , 0.05)
	500.00	531.47	11034754.00	0.15	(2.695 , 0.645)	(0.982 , 0.06)
	1000.00	703.50	13743444.00	0.23	(3.332 , 0.834)	(1.004 , 0.072)
	2500.00	888.97	16379791.00	0.32	(3.945 , 1.032)	(1.026 , 0.08)

De igual manera se obtienen los promedios de los puntos de desempeño (TABLA 34).



Tabla 34.- Promedios de puntos de desempeño, columnas.

Dirección transversal (U1 o X) curva de columnas

Distancia Cercana al epicentro			Curvatura
Promedio	V	D	
Tr=0 (V,D)	787784.397	0.00879197	0.001465328
Tr=100 (V,D)	1746504.38	0.01927441	0.003212401
Tr=500 (V,D)	3380207.81	0.03766613	0.006277689
Tr=1000 (V,D)	4414957.3	0.05100433	0.008500722
Tr=2500 (V,D)	5158055.26	0.06409667	0.010682778

Distancia media al epicentro			Curvatura
Promedio	V	D	
Tr=0 (V,D)	214180.514	0.0024536	0.000408933
Tr=100 (V,D)	2614563.4	0.02879373	0.004798955
Tr=500 (V,D)	5077647.13	0.0560724	0.0093454
Tr=1000 (V,D)	6768594.19	0.0779247	0.01298745
Tr=2500 (V,D)	8159342.79	0.1019723	0.016995383

Distancia lejana al epicentro			Curvatura
Promedio	V	D	
Tr=0 (V,D)	12182.427	0.00024005	4.00083E-05
Tr=100 (V,D)	3063412.46	0.0336	0.0056
Tr=500 (V,D)	5866145.95	0.0672	0.0112
Tr=1000 (V,D)	7542380.42	0.0933	0.01555
Tr=2500 (V,D)	9153296.79	0.1241	0.020683333



Para verificar el estado límite de daño de las columnas, se utiliza la tabla 6 – 7 del Federal Emergency Management Agency (FEMA 273, 1997)

Tabla 35.- TABLA 6-7 FMA 273, 1997.

Table 6-7 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures— Reinforced Concrete Columns

Conditions	Modeling Parameters ⁴			Acceptance Criteria ⁴						
	Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians						
				Component Type						
				Primary		Secondary				
				Performance Level						
a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP			
i. Columns controlled by flexure¹										
$\frac{P}{A_g f_c}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d_s \sqrt{f_c}}$								
≤ 0.1	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.015	0.03
≤ 0.1	C	≥ 6	0.015	0.025	0.2	0.005	0.01	0.015	0.01	0.025
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.0	0.005	0.015	0.010	0.025
≥ 0.4	C	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0	0.005	0.01	0.01	0.015

Se aprecia que las curvaturas generadas en los modelos realizados con el empuje lateral a nivel de losa, no llevan a las columnas a tener desplazamientos que pongan en riesgo a la estructura antes de que tengan fallas los elementos de apoyo, ya sean apoyos de neopreno (modelo 1) o aisladores sísmicos (modelo 2). El caso de la falla en apoyos de neopreno puede no ser tan grave, ya que al ser de poca altura las trabes quedarían apoyadas sobre los cabezales. Este caso es distinto en el modelo con aisladores sísmicos, ya que, al fallar los aisladores, considerando su altura (en este caso de 25cm) la caída de las trabes a esa altura podría presentar fallas por el impacto que estas presentarían sobre los cabezales e incluso podría caer de los cabezales. A pesar de eso, considerando los desplazamientos producidos en las columnas, la estructura presenta un buen comportamiento ante las aceleraciones ingresadas.

En este trabajo se consideró un mismo desplazamiento objetivo para ambos modelos. Esto es hasta alcanzar el desplazamiento máximo de los aisladores sísmicos que les produce la falla. Se llevó a ambos modelos hasta alcanzar un desplazamiento relativo de 41cm, siendo



este obtenido al tener el desplazamiento general con un valor muy cercano a los 50cm; por lo tanto, se llevó a ambos modelos a un desplazamiento objetivo de 50cm, el cual es obtenido con el punto de control ubicado a nivel de losa (Punto 350 en el modelo de sap2000) FIGURA 90, directamente sobre una columna lateral en la zona central. Se analizó esta ya que las columnas laterales de la zona central fueron las que mostraron mayores desplazamientos. Sin embargo, la estructura presenta un comportamiento altamente homogéneo, lo cual produce que los desplazamientos en columnas tengan una variación únicamente de milímetros, permitiendo comprender el comportamiento general de las columnas al analizar los desplazamientos en una, en este caso es una de las columnas laterales de la zona central.

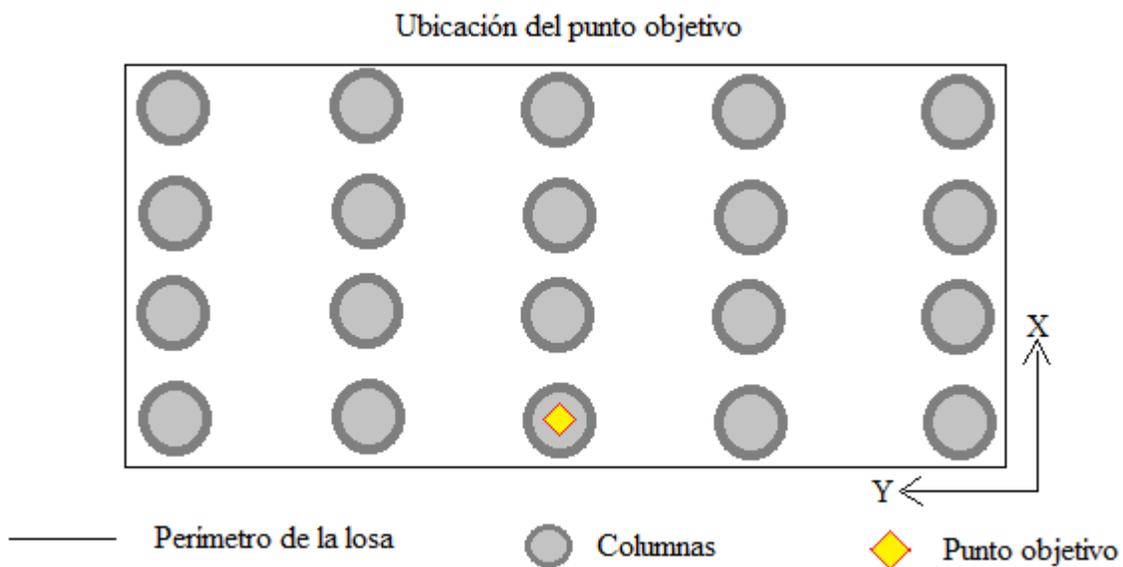


Figura 90.- Ubicación gráfica del punto de control.

Los desplazamientos objetivos logrados en los apoyos de neopreno son irreales, ya que estos abrían fallado para la mayoría de las demandas con desplazamientos muy pequeños, en este trabajo sin embargo se consideró el mismo desplazamiento para ambos modelos para analizar de manera más clara el comportamiento entre ambos. Como se muestra a continuación.



Tabla 36.- Desplazamientos en dirección transversal de ambos modelos

Dirección transversal del puente (X o U1)

Periodo de retorno	Distancia cercana al epicentro			
	Apoyos de neopreno		Aisladores sísmicos	
	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura
Tr = SE	0.006	0.001	0.008	0.00133333
Tr = 100	0.013	0.00216667	0.0088	0.00146667
Tr = 500	0.0216	0.0036	0.0107	0.00178333
Tr = 1,000	0.0258	0.0043	0.0113	0.00188333
Tr = 2, 500	0.0235	0.00391667	0.0125	0.00208333

*

Periodo de retorno	Distancia media al epicentro			
	Apoyos de neopreno			
	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura
Tr = SE	0.0013	0.00021667	0.006	0.001
Tr = 100	0.0141	0.00235	0.009	0.0015
Tr = 500	0.0223	0.00371667	0.009	0.0015
Tr = 1,000	0.0251	0.00418333	0.014	0.00233333
Tr = 2, 500	0.029	0.00483333	0.017	0.00283333

Periodo de retorno	Distancia lejana al epicentro			
	Apoyos de neopreno			
	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura
Tr = SE	0.001	0.00016667	0.0017	0.00028333
Tr = 100	0.0219	0.00365	0.0108	0.0018
Tr = 500	0.0368	0.00613333	0.0166	0.00276667
Tr = 1,000	0.0379	0.00631667	0.0142	0.00236667
Tr = 2, 500	0.0344	0.00573333	0.009	0.0015

*

* Aparente reducción de demanda al incrementar la intensidad en periodos de retorno mayores.



Tabla 37.- Desplazamientos en dirección longitudinal de ambos modelos.

Dirección longitudinal del puente (Y o U2)

Periodo de retorno	Distancia Cercana al epicentro			
	Apoyos de neopreno		Aisladores sísmicos	
	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura
Tr = SE	0.0183	0.00305	0.0229	0.00381667
Tr = 100	0.0412	0.00686667	0.0355	0.00591667
Tr = 500	0.0703	0.01171667	0.0404	0.00673333
Tr = 1,000	0.084	0.014	0.0478	0.00796667
Tr = 2, 500	0.081	0.0135	0.0503	0.00838333 *

Distancia media al epicentro

Periodo de retorno	Apoyos de neopreno			
	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura
Tr = SE	0.0046	0.00076667	0.0083	0.00138333
Tr = 100	0.0657	0.01095	0.036	0.006
Tr = 500	0.1253	0.02088333	0.0473	0.00788333
Tr = 1,000	0.1207	0.02011667	0.0552	0.0092
Tr = 2, 500	0.1314	0.0219	0.065	0.01083333

Distancia lejana al epicentro

Periodo de retorno	Apoyos de neopreno			
	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura	Desplazamiento en columna (m)	Curvatura
Tr = SE	0.0031	0.00051667	0.002	0.00033333
Tr = 100	0.11	0.01833333	0.0468	0.0078
Tr = 500	0.1329	0.02215	0.0576	0.0096
Tr = 1,000	0.1146	0.0191	0.0527	0.00878333 *
Tr = 2, 500	0.0519	0.00865	0.0581	0.00968333 *

* Aparente reducción de demanda al incrementar la intensidad en periodos de retorno mayores.



Los renglones de las TABLAS 35 Y 36 señalados por un asterisco, son valores que indican una aparente reducción de la demanda al aumentar el periodo de retorno, sin embargo esto se debe a que estos valores son los promedios obtenidos de sus respectivas familias de espectros, los cuales al ser incrementados por factores de periodos de retorno altos (en este caso para mil y dos mil quinientos años), la mayoría produjeron demandas que sobrepasaban la capacidad y no brindaban por lo tanto un punto de desempeño. En estos casos los promedios sólo incluyen los puntos de desempeño correspondientes a espectros de valores pequeños lo que conduce a demandas más bajas o con un incremento muy pequeño respecto a los obtenidos con periodos de retorno de 100 y 500 años. Por lo tanto, la aparente reducción no indica menor demanda, sino un incremento muy elevado en la demanda, asociado daños mayores o colapso puesto que se excede la capacidad de los puentes. Los espectros que produjeron esta demanda se pueden apreciar en las TABLAS 25 - 28 señalados con “N.A.”.

Se aprecia que, para los espectros sin escalar para diferentes periodos de retorno, los desplazamientos en las columnas de los modelos con aisladores sísmicos son mayores que los presentados por los mismos espectros en el modelo con apoyos de neopreno, siendo desplazamientos en el orden de milímetros, muy pequeños. Sin embargo, al incrementar la intensidad de las aceleraciones de los espectros, según el periodo de retorno, los desplazamientos en las columnas son reducidos de manera muy importante en el modelo con aisladores sísmicos, reduciendo desplazamientos en el orden de centímetros.

Esta reducción debido al buen comportamiento de los aisladores sísmicos, se aprecia de manera más clara en la reducción de la fuerza cortante en la base de las columnas (cortante basal), produciendo reducciones ante los espectros con periodos de retorno de 1,000 y 2,500 años en el orden de 1,000 tonf. (TABLA 37).



Tabla 38.- Comparación de cortantes basales en ambos modelos.

Distancia Cercana al epicentro

	Dirección transversal			Dirección longitudinal		
	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción
Promedio	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)
Tr= SE	683621	475422	208199	424085	517462	-93376
Tr=100	1521998	829136	692862	943978	791971	152007
Tr=500	2500797	1078274	1422523	1591546	954039	637507
Tr=1000	3021550	1165874	1855677	1881938	1150529	731409
Tr=2500	2756095	1294451	1461644	1819993	1218859	601134

Distancia media al epicentro

	Dirección transversal			Dirección longitudinal		
	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción
Promedio	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)
Tr= SE	188011	184747	3264	124935	200219	-75284
Tr=100	2198736	934092	1264644	1509021	881997	627024
Tr=500	3494740	1250418	2244322	2818944	1181877	1637067
Tr=1000	3423042	1491356	1931686	2728254	1395225	1333029
Tr=2500	4485773	1823415	2662358	2946850	1630355	1316495

Distancia lejana al epicentro

	Dirección transversal			Dirección longitudinal		
	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción
Promedio	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)	V (kgf)
Tr= SE	10634	14897	-4263	10587	10889	-303
Tr=100	2577289	1177052	1400237	2510899	1203878	1307022
Tr=500	4326310	1816705	2509605	2972338	1487670	1484668
Tr=1000	4472231	1543260	2928972	2522021	1363778	1158243
Tr=2500	4042545	979279	3063266	1199216	1466750	----



Tabla 39.- Porcentajes de reducción de cortante basal.

Distancia cercana al epicentro	Promedio	Dirección transversal	Dirección longitudinal
	Tr= SE	30%	-22%
Tr=100	46%	16%	
Tr=500	57%	40%	
Tr=1000	61%	39%	
Tr=2500	53%	33%	

Distancia media al epicentro	Promedio	Dirección transversal	Dirección longitudinal
	Tr= SE	2%	-60%
Tr=100	58%	42%	
Tr=500	64%	58%	
Tr=1000	56%	49%	
Tr=2500	59%	45%	

Distancia lejana al epicentro	Promedio	Dirección transversal	Dirección longitudinal
	Tr= SE	-40%	-3%
Tr=100	54%	52%	
Tr=500	58%	50%	
Tr=1000	65%	46%	
Tr=2500	76%	----	

---- Valor no considerado debido a que en la mayoría de sus casos no se presentó intersección entre demanda v capacidad.

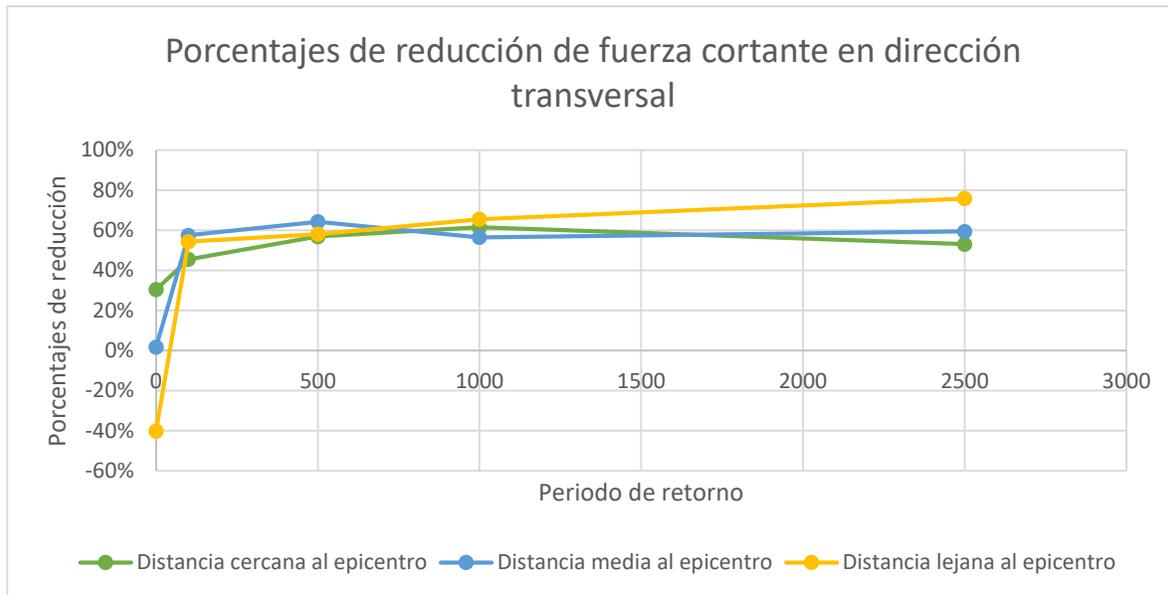


Figura 91.-Porcentajes de reducción de fuerza cortante en dirección transversal

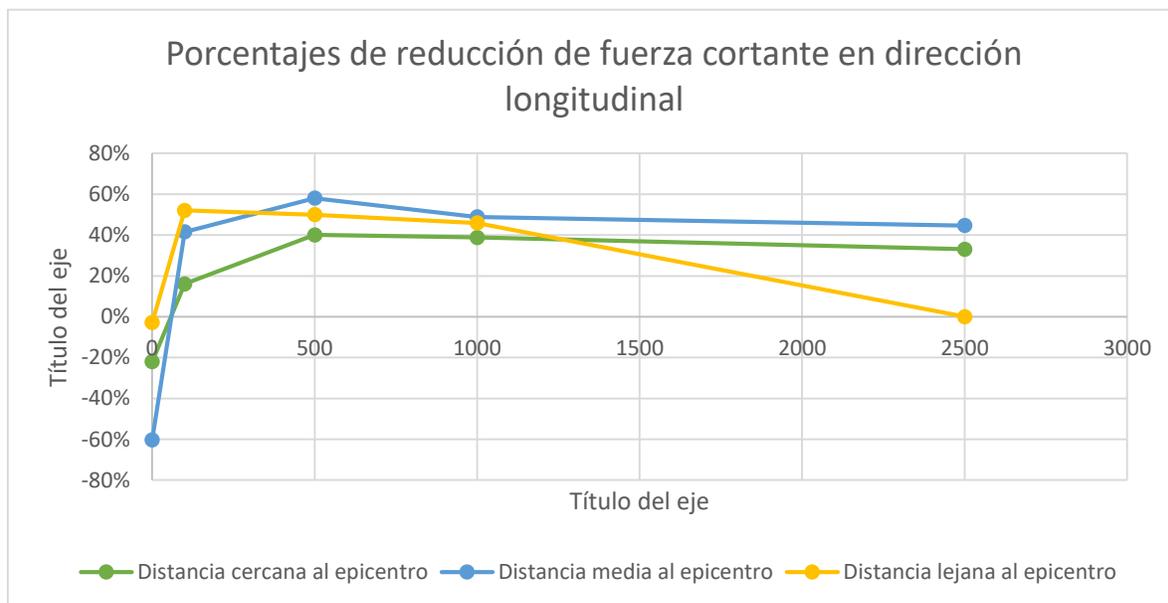


Figura 92.-Porcentajes de reducción de fuerza cortante en dirección longitudinal



Tabla 40.- Comparación de desplazamientos en ambos modelos

Distancia Cercana al epicentro

	Dirección transversal			Dirección longitudinal		
	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción
Promedio	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)
Tr= SE	0.0060	0.0080	-0.0020	0.0183	0.0229	-0.0046
Tr=100	0.0130	0.0088	0.0042	0.0412	0.0355	0.0057
Tr=500	0.0216	0.0107	0.0109	0.0703	0.0404	0.0299
Tr=1000	0.0258	0.0113	0.0145	0.0840	0.0478	0.0362
Tr=2500	0.0235	0.0125	0.0110	0.0810	0.0503	0.0307

Distancia media al epicentro

	Dirección transversal			Dirección longitudinal		
	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción
Promedio	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)
Tr= SE	0.0013	0.0060	-0.0047	0.0046	0.0083	-0.0037
Tr=100	0.0141	0.0090	0.0051	0.0657	0.0360	0.0297
Tr=500	0.0223	0.0090	0.0133	0.1253	0.0473	0.0780
Tr=1000	0.0251	0.0140	0.0111	0.1207	0.0552	0.0655
Tr=2500	0.0290	0.0170	0.0120	0.1314	0.0650	0.0664

Distancia lejana al epicentro

	Dirección transversal			Dirección longitudinal		
	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción	Apoyos de neopreno	Aisladores sísmicos	Reducción
Promedio	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)	D (m)
Tr= SE	0.0010	0.0017	-0.0007	0.0031	0.0020	0.0011
Tr=100	0.0219	0.0108	0.0111	0.1100	0.0468	0.0632
Tr=500	0.0368	0.0166	0.0202	0.1329	0.0576	0.0753
Tr=1000	0.0379	0.0142	0.0237	0.1146	0.0527	0.0619
Tr=2500	0.0344	0.0090	0.0254	0.0519	0.0581	----



Tabla 41.- Porcentajes de reducción en desplazamientos

Distancia cercana al epicentro	Promedio	Dirección transversal	Dirección longitudinal
	Tr= SE	-33%	-25%
Tr=100	32%	14%	
Tr=500	50%	43%	
Tr=1000	56%	43%	
Tr=2500	47%	38%	

Distancia media al epicentro	Promedio	Dirección transversal	Dirección longitudinal
	Tr= SE	-362%	-80%
Tr=100	36%	45%	
Tr=500	60%	62%	
Tr=1000	44%	54%	
Tr=2500	41%	51%	

Distancia lejana al epicentro	Promedio	Dirección transversal	Dirección longitudinal
	Tr= SE	-70%	35%
Tr=100	54%	52%	
Tr=500	58%	50%	
Tr=1000	65%	46%	
Tr=2500	76%	----	

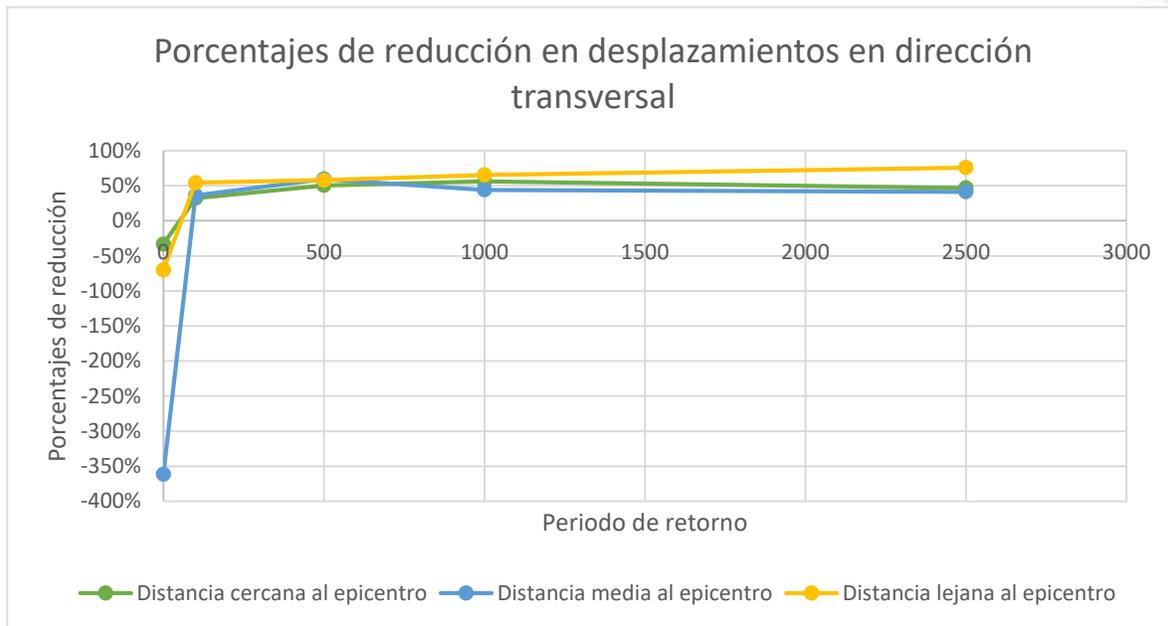


Figura 93.- Porcentajes de reducción en desplazamientos en dirección transversal

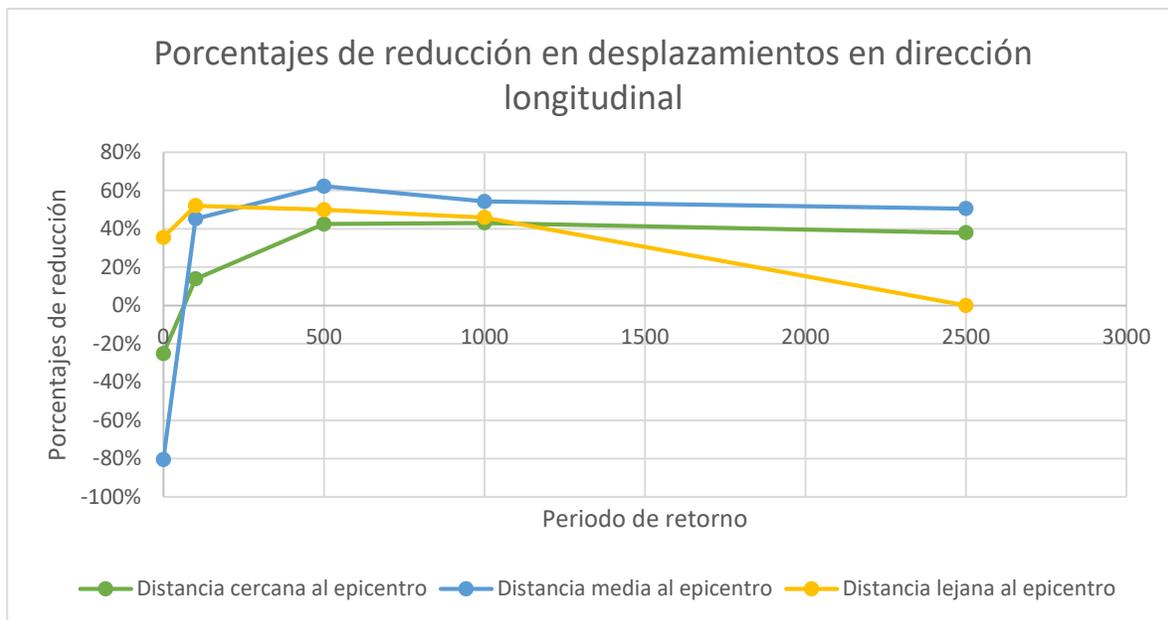


Figura 94.- Porcentajes de reducción en desplazamientos en dirección longitudinal



Conclusiones

Los puentes vehiculares están conformados típicamente de manera similar al “modelo 1” con apoyos de neopreno sobre los que descansan las trabes. Al analizar los resultados de los dos modelos, se aprecia claramente un mejor comportamiento al utilizar los aisladores sísmicos con núcleo de plomo (LRB) en el “modelo 2”, brindando una mayor flexibilidad al sistema estructural, y disipando la energía de manera eficiente debido a su núcleo de plomo. El sistema permite grandes desplazamientos laterales de la superestructura sin causar daños a los elementos estructurales. También debido a la gran flexibilidad de los aisladores en comparación a los apoyos de neopreno, la energía que transmiten a las columnas presenta una importante reducción, esto produce menores fuerzas laterales en las columnas que mejora la seguridad en las mismas al estar sometidas a menores elementos mecánicos. Incluso debido a esta reducción de demanda lateral en la columna, se podrían recalcular los elementos mecánicos para analizar una posible reducción de la sección transversal de las columnas.

Con el aumento de la distancia epicentral se observa que aun cuando las aceleraciones sísmicas se reducen de manera muy considerable, siguen siendo muy importantes. Con estos resultados también se apreció la gran demanda de estas aceleraciones, indicando la importancia de considerar los efectos sísmicos aun cuando la zona se encuentre fuera de una distancia próxima a los epicentros.

Realizando un análisis adecuado de todas las fuerzas actuantes que se presentan en la estructura y se diseña y construye adecuadamente, se puede llegar a un diseño estructural que presente un buen comportamiento. Si adicionalmente se usan dispositivos de disipación sísmica, se puede mejorar el comportamiento esperado de las estructuras para evitar daños mayores y eventualmente su colapso. Esto se puede apreciar con la reducción de fuerzas transmitidas a las columnas, disminuyendo altamente las fuerzas cortantes en las columnas, así como sus desplazamientos.

Se aprecia que en el caso de los espectros sísmicos con aceleraciones más bajas (espectros originales), así como los promedios de las zonas lejanas al epicentro para 2,500 años en donde muy pocos proporcionaron punto de desempeño promediado, debido a que en su mayoría la



demanda excede la capacidad, las reducciones son negativas. Esto indica un incremento de la demanda en las columnas, por lo tanto, en esos casos no parece adecuado colocar el sistema de aislamiento. No obstante, Los aumentos que causa en las fuerzas cortantes (así como en los desplazamientos en el extremo superior de las columnas) son de proporciones relativamente pequeñas, los cuales no llegan a comprometer la estabilidad de la estructura, siendo aumento de desplazamientos en el orden de milímetros, y fuerzas cortantes en el orden de decenas de toneladas. Por otro lado, cuando las magnitudes de las aceleraciones aumentan de manera importante, al ser incrementados los espectros con los periodos de retorno, los aisladores sísmicos reducen de manera muy significativa las fuerzas cortantes y los desplazamientos, con reducciones que rondan el 50% para la mayoría de los casos, con orden de centímetros de reducciones en desplazamientos y millares de toneladas en fuerzas cortantes. Lo cual indica un mejor comportamiento esperado de la estructura al utilizar los aisladores sísmicos LRB.

En general los puentes presentan reducciones en la demanda de fuerza cortante basal al utilizar los aisladores sísmicos. También se observa de manera más clara que en los casos en que ocurre un aumento de fuerza cortante basal al incluir los aisladores sísmicos, esta es mínima comparada con las grandes reducciones que aportan estos dispositivos. Las mayores reducciones se presentan en la dirección transversal del puente, al comparar con la dirección longitudinal, así como una mayor eficiencia en la reducción de fuerzas a implementarlos en zonas alejadas de los epicentros.

En conclusión, la implantación de aisladores sísmicos con núcleo de plomo es una opción altamente adecuada para brindar mayor seguridad ante la acción sísmica, al reducir fuerzas y desplazamientos en los elementos estructurales, cumpliendo el objetivo brindar refuerzo estructural ante la acción sísmica para mejorar la capacidad y el comportamiento durante dichos eventos, garantizando mayor seguridad para los usuarios.



REFERENCIAS

Vlacev Toledo Espinoza, “**Pushover - Análisis No Lineal Estático en Edificios de Concreto Armado**”, Libro III de la Colección: Ingeniería Sísmica Basada en Desempeño – PBEE.

Yaiza Bolívar Muñoz Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, tutor: Alejandro E. Martínez Castro, “**Modelo en sap2000 para disipadores superelásticos sma-nitinol. aplicación a un caso de aislamiento sísmico en un puente**”, Departamento de Mecánica de Estructuras, Universidad de Granada Edificio Politécnico Fuentenueva, C/ Severo Ochoa s/n, CP 18002 Granada (España), June 2013.

Dynamic isolation systems, “**Aislamiento sísmico para edificios y puentes**”, <http://www.dis-inc.com>.

Marcelo Andrés Saavedra Quezada. Valdivia - Chile 2005, “**análisis de edificios con aisladores sísmicos mediante procedimientos simplificados.**”, tesis de licenciatura, Universidad Austral de Chile, Facultad de ciencias de la ingeniería.

Ian Buckle, Moustafa Al-Ani and, Eric Monzon, November 2011, “**seismic isolation design examples of highway bridges**”, NCHRP 20-7 / Task 262(M2).

Jesús Valdés González¹, Jaime De la Colina Martínez¹ y Sergio A. Díaz Camacho¹, “**evaluación experimental de la capacidad de aislamiento de los dispositivos de apoyo de un puente vehicular**”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

Roberto Ignacio Soto Vargas, “**Proposición de norma para el diseño de puentes con aisladores sísmicos**”, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile agosto 2007.

Servicio sismológico nacional, “**Magnitud de un sismo**”, Instituto de geofísica, UNAM.

American Association Of State Highway and Transportation Officials “**AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**” Customary U.S. Units 2012



Maribel Burgos Namuche **“Disipación de energía sísmica para el diseño y reforzamiento de edificaciones”**, UPC, escuela de postgrado, diplomado en estructuras.

Lily Marlene Bonilla Sosa, **“Teoría del aislamiento sísmico para edificaciones”**, Tesis de licenciatura, Facultad de ingeniería, UNAM. Noviembre 2012.

Saúl Enrique Crespo Sánchez Daniel Rodríguez Naranjo Francisco Carrión Viramontes Juan Antonio Quintana Rodríguez **“Análisis de efectos longitudinales y transversales en puentes debidos a cargas vivas vehiculares”**, instituto mexicano del transporte publicación técnica No. 398 Sanfandila, Qro, 2014.

Francisco Crisafulli, Elbio Villafañe, **“Espectros de respuesta y diseño”**, Guia de estudio, Universidad Nacional de Cuyo Facultad de Ingeniería, mayo 2002.

Área de física de la tierra, **“Tratamiento de acelerogramas”**, Universidad de Alicante, practica 5, anexo IV.

N·CMT·2·08/04 **“Placas y apoyos de neopreno”**, Características de los materiales, parte 2, materiales para estructuras. Agosto 2004.

Claudio Descouvieres Vargas, **“registro del estudio pionero en chile de aisladores sísmicos elastomericos para aplicacion en edificios de baja altura”**, Tesis de licenciatura, universidad de chile facultad de ciencias fisicas y matematicas departamento de ingenieria civil, santiago de chile 2016.

Omar Montes Alvarez, José Manuel Jara Guerrero, Bertha Alejandra Olmos Navarrete, **“Índices de daño de pilas de puentes encamisadas con concreto reforzado”**, Sociendad mexicana de ingeniería estructural, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puerto Vallarta, Jalisco, 2014

Ian Buckle, Michael Constantinou, Murat Dicleli and Hamid Ghasemi. **“Seismic isolation of highway bridges”**, U.S. Departament of transpotation federal highway administration, Special report MCEER-06-SP07, August 21 2006.

Máximo G. Peralta Álvarez **“Análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal del hospital de vielha”**, Tesina de maestría, UPC, Pprograma de máster en ingeniería del terreno e ingeniería sísmica barcelona, junio del 2012



Federal Emergency Management Agency, “**Nehrp guidelines for the seismic rehabilitation of buildings**”, FEMA publication 273, october 1997, Washington, D.C.

Darío Rivera-Vargas, Juan Gerardo Terrón Herrera y Carlos Arce León, “**Eestimación de la rigidez agrietada para el análisis sísmico en estructuras de concreto reforzado**”, Sociendad mexicana de ingeniería estructural, XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puerto Vallarta, Jalisco, 2014.

Darío Rivera-Vargas, Juan Gerardo Terrón Herrera y Carlos Arce León. “**Estimación de la rigidez agrietada para el análisis sísmico en estructuras de concreto reforzado**”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puerto Vallarta, Jalisco, 2014.

Priestley, M., Seible, F., & Calvi, G. (1996). “**Seismic Design and Retrofit of Bridges. New York**” JOHN WILEY & SONS, INC

NTC (6 de Octubre de 2004). “**Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto**”. GACETA OFICIAL DEL DISTRITO FEDERAL, 194

CFE. (2015). “**Manual de Diseño de Obras Civiles. México**”, Comisión Federal de Electricidad.

CSI. (2007). SAP2000, “**Integrated Software for Structural Analysis & Design**”, Berkeley, California: Computers and Structures, Inc.

Microsoft. Office (2016). “**Excel**”. V.16.

Microsoft Office (2016). “**Word**”. V. 16.