Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería
en el área de estructuras

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

EFECTO DEL MOVIMIENTO SÍSMICO VERTICAL DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES

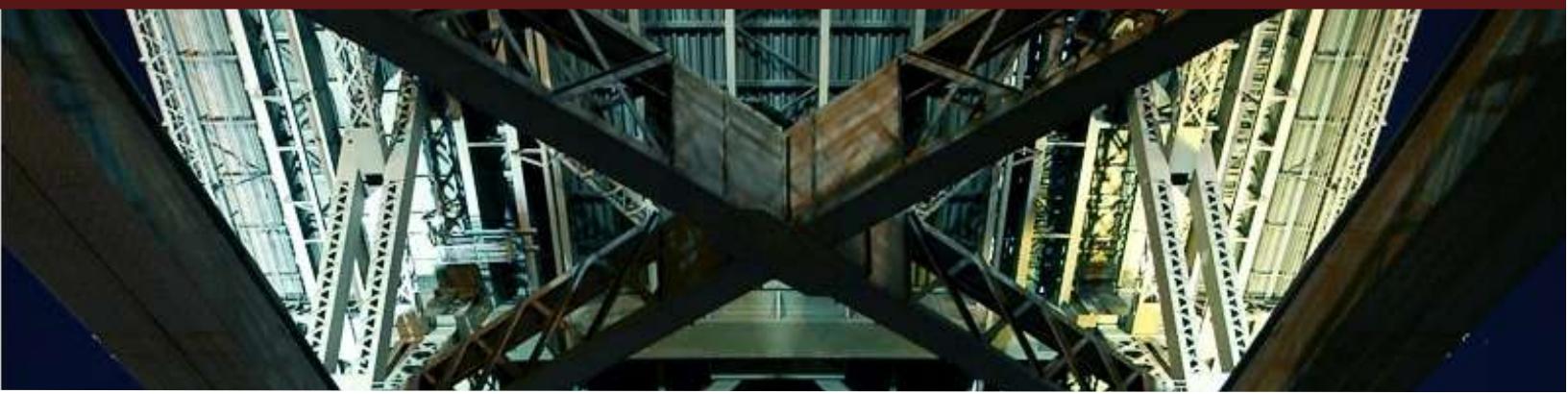
Presenta

Ing. Otilio Alvarez Mosqueda

Para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Asesor: Dr. Manuel Jara Díaz

Morelia, Michoacán Agosto 2012



Contenido

Capítulo 1 Introducción 1
1.1. Objetivos 1
1.2. Organización de la tesis 2
1.3. Líneas futuras de investigación 4
Capítulo 2 Métodos de construcción 5
2.1. Puentes tipo viga 5
- Construcción mediante lanzamiento por incrementos sucesivos 5
- Construcción mediante voladizos balanceados 12
2.2. Puentes en arco 16
- Tipología de puentes en arco 17
- Proceso constructivo 18
2.3. Puentes atirantados 20
- Componentes del puente 21
- Proceso constructivo 25
Capítulo 3 Espectro de respuestas verticales 30
3.1. Características de la componente vertical de los sismos 30
- Arribo de las ondas 32
- Normas, códigos y reglamentos 35
3.2. Componente vertical en sismos mexicanos 37
Capítulo 4 Análisis lineal de los puentes en distintas etapas de construcción 49
4.1. Puente recto tipo viga 49
4.2. Puente curvo 64
4.3. Puente voladizo balanceado 77
4.4. Puente en arco 92
4.5. Puente atirantado 108
Capítulo 5 Identificación de parámetros principales 148
5.1. Puente recto tipo viga 149
5.2. Puente curvo 151
5.3. Puente voladizo balanceado 153

5.4. Puente en arco 156
5.5. Puente atirantado 158
Capítulo 6 Análisis no lineal 162
6.1. Registros sísmicos 162
6.2. Propiedades de las secciones de las pilas de los puentes 165
- Puente recto tipo viga 166
- Puente curvo 171
- Puente en voladizos balanceados 173
6.3. Resultados del análisis 176
6.4. Análisis de los puentes terminados 185
Capítulo 7 Análisis de resultados 192
7.1. Puente recto tipo viga (Puente A) 194
7.2. Puente curvo (Puente B) y puente voladizo balanceado (Puente C) 197
Capítulo 8 Conclusiones 198
Índice de figuras 201
Índice de tablas 212
Bibliografía 216

Capítulo 1 Introducción

Las características de la componente vertical y el efecto que ocasiona la aceleración vertical a los puentes, han sido estudiadas por varios investigadores (Broekhuizen, 1996; Papazoglou and Elnashai, 1996; Collier and Elnashai, 2001; Button et al., 2002); sin embargo, existe una carencia del estudio durante las etapas de construcción de este tipo de estructuras.

El interés y la importancia de estudiar el efecto de la componente vertical durante la construcción de puentes se origina en las distintas características de resistencia y rigidez que tienen los puentes medios y largos durante las fases constructivas, y que difieren notablemente de las de los puentes terminados. Además los tiempos de construcción favorecen la ocurrencia de sismos de magnitudes moderadas y/o altas, lo cual resulta desfavorable para este tipo de estructuras durante su construcción. El derrumbe que ocurrió en el año 2004 durante la construcción del puente empujado "San Cristóbal", en la carretera que conecta las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de Las Casas, en Chiapas, fue motivación adicional para el estudio de la componente vertical de los sismos durante la construcción de puentes grandes.

Desde 1973, cuando Newmark et al. publicaron los resultados de un estudio donde obtuvieron los cocientes de las aceleraciones máximas del terreno de la componente vertical entre la horizontal (V/H) de 33 registros sísmicos de EEUU, se ha considerado la componente vertical como 2/3 de la horizontal para motivos de diseño. Sin embargo, estudios posteriores han concluido que tal valor resulta inadecuado, sobre todo para sismos de campo cercano y magnitudes altas donde se presentan casos en los que la relación V/H sobrepasa la unidad.

1.1. Objetivos

En el presente trabajo se estudiara el efecto de la componente vertical en las etapas constructivas de tres diferentes tipos de puentes con el objetivo general de determinar los elementos y secciones de cada puente que resultan más afectados. Para los puentes tipo viga se estudiara el método de construcción mediante lanzamiento por voladizos sucesivos para un puente recto y

otro curvo, y el método conocido como voladizos balanceados. Para puentes en arco se estudiara el método conocido como voladizos sucesivos con estabilización por tirantes, y finalmente para puentes atirantados se estudiara su construcción mediante voladizos sucesivos. Se realizará un análisis en la historia del tiempo de cada una de las etapas sometiéndolas a registros sísmicos reales.

Para poder cumplir con el objetivo general, es necesario cumplir con los objetivos particulares siguientes. El primer objetivo es comprender el proceso constructivo de los diferentes tipos de puentes de tal forma que se puedan determinar las cargas a las que están sujetos cada uno de ellos y que se puedan estimar las etapas más críticas durante su construcción. Posteriormente se busca caracterizar un conjunto de registros sísmicos mexicanos para poder determinar cuales son los registros sísmicos más adecuados para ser utilizados en los análisis. Se identifican las etapas críticas de construcción, los elementos más vulnerables y las secciones de cada una de las etapas constructivas que resulten más afectadas por la componente vertical. Mediante un análisis no lineal se buscará determinar el daño resultante en las pilas así como su ductilidad para poder definir el tipo de puente más afectado por la componente vertical del sismo.

1.2. Organización de la tesis

En el capitulo dos se describe cada uno de los métodos constructivos de manera concisa para cada uno de los tipos de puentes descritos. Se habla sobre el origen de cada método y se explican los pasos constructivos que se siguen con mayor frecuencia en la construcción de puentes reales.

El capitulo siguiente se desarrolla el tema de la componente vertical, donde se habla sobre antecedentes históricos, el arribo de las ondas verticales y horizontales, el efecto que le causa el tipo de terreno a la componente vertical y las consideraciones que hacen las diferentes normas, códigos y reglamentos internacionales y nacionales sobre dicha componente. Además se describe la recopilación que se realizó de un total de cien registros sísmicos de campo cercano (distancia epicentral menor de 60 km) y magnitud de media a alta (mayor de 5.0) de la Base Mexicana de Sismos Fuertes, con a finalidad de caracterizarlos, estudiar la influencia de los parámetros que tienen mayor efecto en la componente vertical y elegir sismos representativos para los análisis que se describen en los siguientes capítulos.

En el cuarto capítulo se definen las características de cada uno de los puentes que se seleccionaron para el estudio, tales como: altura y longitud del puente, dimensiones de las pilas, espesores del tablero, entre otras. Se busco estudiar puentes lo más apegado a estructuras reales, por lo que en este capitulo se mencionan los puentes existentes que sirvieron de base a los modelos estudiados. Se estudiaran al menos cuatro etapas para cada tipo de puente, con el propósito de cubrir las condiciones críticas que se presentan durante el desarrollo de los distintos métodos de construcción.

Para el análisis lineal se usó el programa comercial SAP2000 versión 14.2.0. Se realizó un análisis en la historia del puente de cada etapa constructiva considerando solamente las dos componentes horizontales de cada registro sísmico y otra considerando las tres componentes del registro sísmico (las dos horizontales y la vertical). Con las fuerzas resultantes se obtuvieron cinco cocientes para determinar el efecto que causa la componente vertical. Los resultados se presentan en forma de tablas al concluir la sección de cada etapa constructiva.

Con base en los resultados del capítulo anterior, se identificaron los cables y las secciones del tablero y de las pilas de cada etapa constructiva que se vieron más afectadas por la componente vertical. Al final del capítulo cinco se presenta una tabla con resultados generales.

En el capitulo seis, se extiende el análisis de las tres etapas constructivas críticas al incorporar el análisis no lineal en la historia del tiempo. Se analizaron los tres puentes que resultaron más afectados por la componente vertical de los cuales se tomó la etapa de construcción más desfavorable. Para este análisis se utilizó el programa comercial Perform 3D. Dadas las características de los puentes, se consideró la no linealidad del material y la no linealidad geométrica. Para la no linealidad del material se adoptó un modelo trilineal de la relación momento – curvatura. Al igual que para el análisis lineal, se realizaron dos análisis, uno considera las tres componentes del sismo y el otro considera solamente dos. De los cien registros seleccionados en el capitulo tres se tomaran los diez registros que presentan una relación de aceleración máxima del terreno vertical / aceleración máxima del terreno horizontal (V/H) mayor.

Finalmente se presentan los cocientes de las fuerzas resultantes obtenidas utilizando las tres componentes y dos componentes y se obtuvieron índices de daño basados en la ductilidad y en el índice de Park y Ang para columnas de concreto reforzado.

1.3. Líneas futuras de investigación

Algunos aspectos que podrían incorporarse en futuros estudios es la consideración de un mayor número de puentes para cada uno de los diferentes métodos constructivos con variación en sus propiedades geométricas.

También es conveniente incorporar un mayor número de registros sísmicos tanto para el análisis lineal como el no lineal con la finalidad de obtener una muestra más amplia de resultados y poder determinar con mayor precisión los elementos del puente que resulten más afectados por la componente vertical.

Por otro lado, en vista del incremento en las fuerzas axiales en el tablero, es conveniente realizar un estudio que incluya la no linealidad del tablero.

Capítulo 2 Métodos de construcción

2.1. Puentes tipo viga

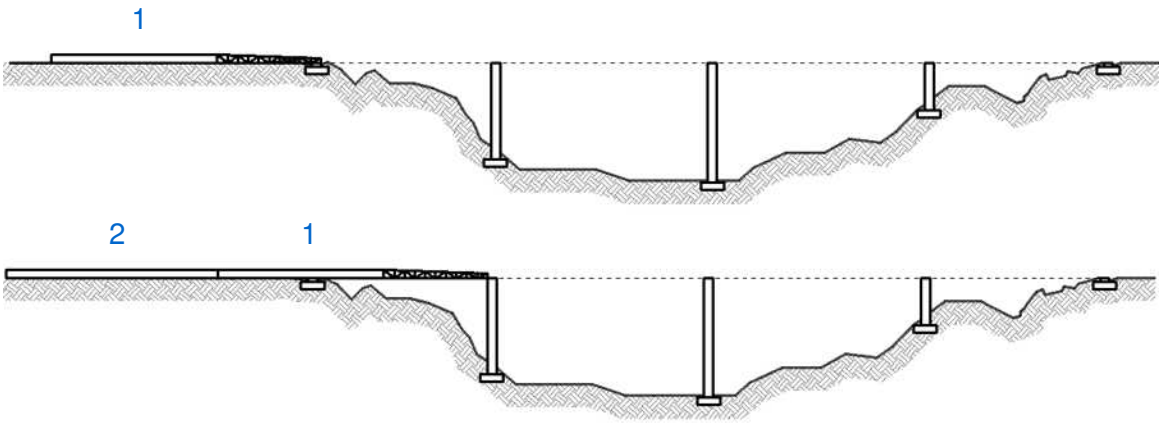
Los puentes tipo viga tienen la forma estructural más simple de todos los tipos de puentes. Están simplemente apoyados en cada extremo de su tablero por lo que no existe transmisión de momentos en sus apoyos.

Se analizarán dos formas de construcción de este tipo de puentes, la primera es conocida como lanzamiento por incrementos sucesivos y la segunda como voladizos balanceados.

- **Construcción mediante lanzamiento por incrementos sucesivos**

Este tipo de construcción fue implementada por primera vez en 1962 en el puente del Río Caroni en Venezuela. Después de ser perfeccionada en Alemania, en 1979, fue introducida a México en la construcción del puente Río Tula.

El método consiste en ir fabricando la superestructura del puente en secciones, en la parte posterior de un estribo, en el parque de prefabricación. Cada sección nueva es colada directamente contra la anterior en un molde fijo, después de haber fraguado, la sección se desplaza mediante dispositivos hidráulicos especiales. El procedimiento es conocido como lanzamiento por incrementos sucesivos, ilustrado en la Figura 2.1.a.



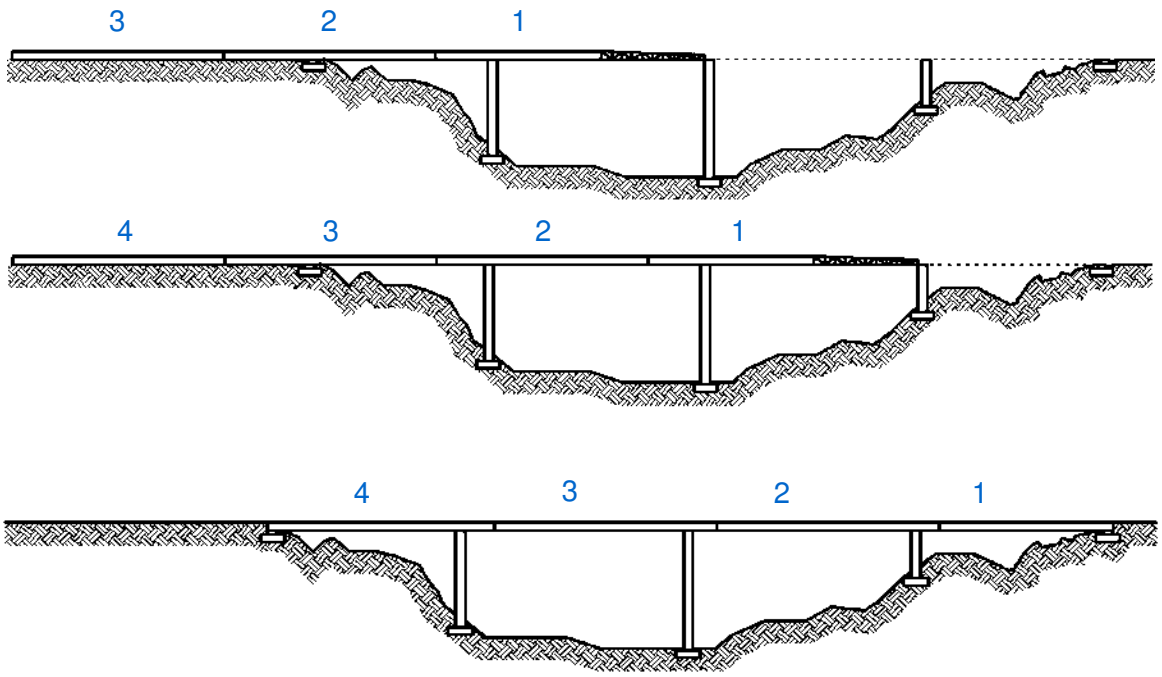


Figura 2.1.a *Proceso de lanzamiento por incrementos sucesivos.*

- **Condiciones necesarias para emplear el método**

Éste método es recomendable para puentes con claros de 30 a 60 m ya que generalmente resulta más económico que otros procedimientos. Puede ser aplicado para claros mayores, entre 60 – 80 m, y aún más, pero empleando soportes temporales intermedios entre cada claro. Es recomendable que todos los claros tengan la misma longitud o que sean lo más similares posible.

El método de lanzamiento por incrementos sucesivos puede ser utilizado para puentes rectos o para puentes curvos, siempre y cuando la curvatura sea de radio constante a lo largo del puente, ya sea curvatura en planta o elevación.

La superestructura debe consistir de una viga de sección constante con una relación de esbeltez, esto es la relación claro – altura del tablero, no mayor a 17. Normalmente los valores más usuales oscilan entre 12 y 15, el primer valor para puentes con claros cortos y el segundo para puentes con claros mayores.

La sección transversal más apropiada es en cajón de una sola celda o doble viga T; secciones en cajón con doble celda también han sido utilizadas pero su construcción resulta más difícil (VLS International LTD., 1977).

Se debe de contar con el área suficiente atrás de uno de los estribos para la construcción de cada sección. Es preferible que el parque de prefabricación se ubique atrás del estribo con menor elevación para que no exista la necesidad de utilizar equipo de frenado durante el lanzado.

- **Fabricación de las secciones**

La superestructura del puente debe estar conformada por secciones de 15 a 25 m de longitud, dependiendo de la longitud total del puente.

Generalmente se emplean moldes de acero ajustables para poder cubrir la variación de espesores en la sección. Los moldes deberán ser autocolapsables y movibles, con la finalidad de facilitar el proceso de cimbrado y descimbrado.

Debido a que la superestructura estará sujeta a un cambio constante de momentos durante el lanzamiento, es necesario que disponga de un presfuerzo céntrico, esto es, un presfuerzo constante y recto colocado en las fibras superiores e inferiores de la estructura que sea capaz de soportar la variación de momentos que sufrirá.

- **Nariz de lanzamiento**

La nariz de lanzamiento por lo general es una estructura metálica colocada en la parte frontal del puente que será lanzado con la finalidad de reducir el momento generado al estar en voladizo (Figura 2.1.b).

Su longitud es de 60 a 65 % de la longitud del claro a cubrir y su peso varía entre 1 y 2 t/m, o más, si su longitud es mayor de 30 m.

Figura 2.1.b *Nariz de lanzamiento*

(Tomada de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Itztalbruecke_2005-07-24.jpg).

Debido al peso propio de la nariz se genera una deflexión elástica en su extremo libre, la cual es eliminada con la ayuda de gatos hidráulicos especiales colocados en la parte frontal de la nariz. Al aproximarse a una pila los gatos son utilizados para nivelar la superestructura y permitir la continuidad del lanzamiento.

El sistema de conexión entre la nariz de lanzamiento y la superestructura debe garantizar la transferencia de los momentos flexionantes y esfuerzos cortantes para proveer una continuidad estructural perfecta. Al finalizar el lanzamiento, el sistema de conexión debe permitir desarmar fácilmente la nariz.

- **Apoyos deslizantes**

Los apoyos deslizantes son colocados en cada punto de apoyo del puente como lo son las pilas, estribos y en el parque de prefabricación.

Los apoyos están formados por un bloque de concreto fuertemente armado, de 15 a 35 cm de espesor, sobre el cual se sitúa una lámina de acero inoxidable de 2 mm. Encima de la lámina mencionada se colocan almohadillas de neopreno – teflón las cuales entran en contacto con la superestructura (Figura 2.1.c). Cuando la superestructura es lanzada y entra en movimiento, las almohadillas son arrastradas hacia adelante y van siendo expulsadas permitiendo así que se vuelvan a introducir por detrás.

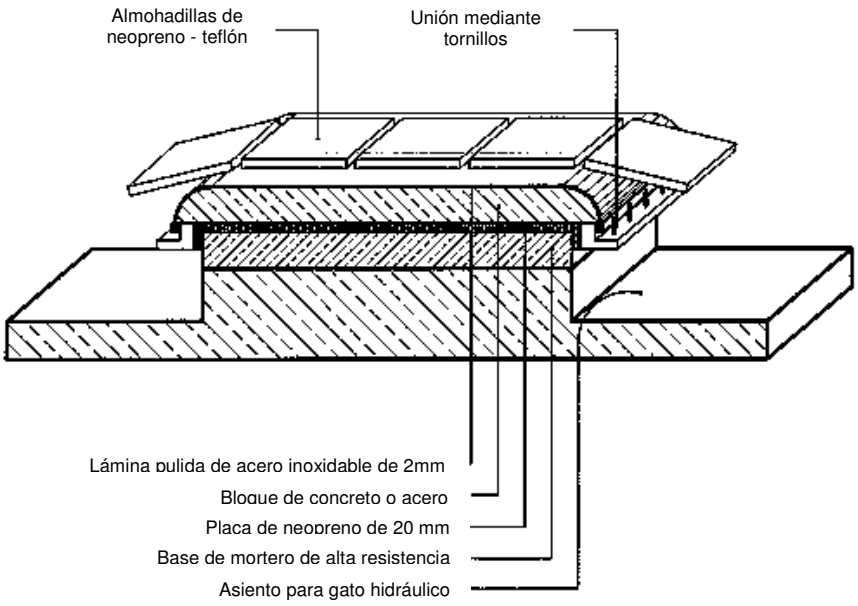


Figura 2.1.c *Apoyo deslizante*

(Adaptada de Marco Rosignoli, 2006).

El coeficiente de fricción entre el neopreno – teflón y el acero inoxidable es aproximadamente de 5% aunque puede ser disminuido hasta un 1% manteniendo el teflón totalmente limpio y aplicándole silicón.

También son necesarias guías laterales metálicas con almohadillas verticales en el apoyo para mantener el alineamiento longitudinal correcto de la superestructura durante el lanzamiento, además deben ser capaces de resistir la respuesta sísmica de la estructura para el sismo de diseño correspondiente a la etapa constructiva, así como de los efectos del viento transversal.

- **Sistema de empuje**

Existen variaciones en cuanto al sistema de empuje que se utiliza, el más usual y moderno consiste en un cilindro vertical que levanta al puente y que a su vez está conectado a uno horizontal el cual lo empuja.

Usando el pistón vertical, la superestructura es levantada 4 ó 5 mm. Como consecuencia, la reacción de soporte de la viga continua es transferida del bloque de soporte al sistema de empuje.

Al accionar el pistón horizontal, se empuja a la superestructura gracias al coeficiente de fricción alto que existe entre la parte inferior de la superestructura y la parte superior del sistema de empuje.

Cuando el pistón llega a su límite (varía entre 0.25 y 1.00 m), la superestructura se baja al bloque de soporte.

Con los pistones descargados el sistema regresa a su posición inicial para repetir el ciclo.

Cada ciclo tarda aproximadamente 2 minutos. El tiempo necesario para lanzar una sección de 20 m es del orden de 3 horas.

En caso de presentarse algún error con el alineamiento de la superestructura es posible regresar al puente con el mismo sistema de lanzado para realizar la corrección necesaria.

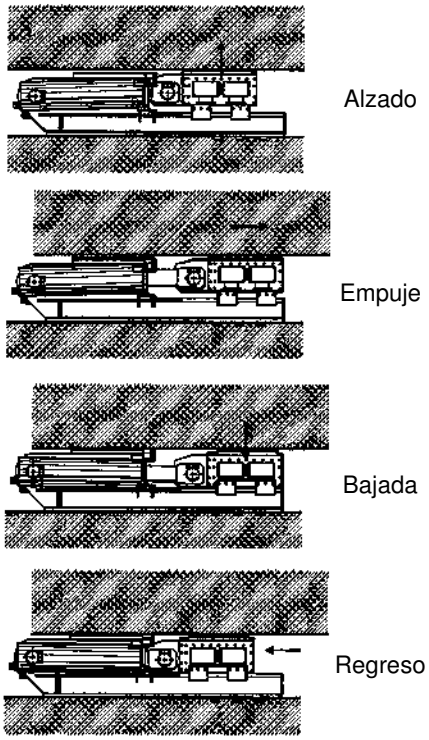


Figura 2.1.d *Sistema de empujado (Adaptada de Marco Rosignoli, 2006).*

- **Situación definitiva del puente**

Al finalizar el lanzado, la superestructura del puente es continua y se encuentra sobre apoyos que son soportados a su vez, mediante pilas y estribos.

La superestructura del puente se restringe longitudinalmente al fijarla al estribo de lanzamiento, por comodidad y economía. Con esta fijación se pretende transmitir las fuerzas longitudinales al terreno, como las que producen el sismo, el frenaje y la deformación por temperatura.

Asimismo la estructura está restringida transversalmente para impedir el movimiento en esa dirección debido a fuerzas ocasionadas por sismo y viento. Esto se logra mediante guías laterales en los apoyos definitivos.

Un puente empujado de interés es el puente San Cristóbal cuyo costo fue de mil 200 millones de pesos, el cual se derrumbó el 24 de Octubre de 2004 al llevar un avance del 95 % de su

construcción. Afortunadamente no hubo pérdidas humanas. El puente se construía en el estado de Chiapas comunicando la ciudad de Tuxtla Gutiérrez con San Cristóbal de las Casas, con una curvatura horizontal de 2°45' y pendientes transversal y longitudinal de 10 y 5%, respectivamente. En las siguientes figuras se muestran imágenes del derrumbe así como croquis de su elevación y planta.

Figura 2.1.e *Derrumbe del Puente San Cristóbal.*

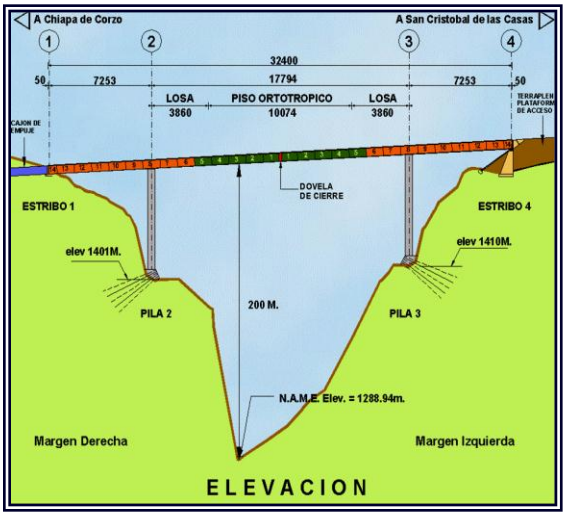


Figura 2.1.f *Elevación del Puente San Cristóbal.*

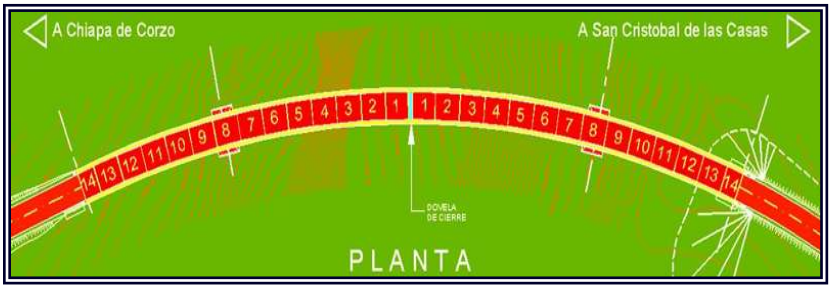


Figura 2.1.g *Planta del Puente San Cristóbal.*

De acuerdo con peritajes llevados a cabo por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) se concluyó oficialmente que el colapso se debió al desplazamiento horizontal que mostraba una de las pilas, el cual sería corregido una vez unido el puente; sin embargo una serie de sismos de 4 grados aceleraron su caída (Solís, 2005).

- **Construcción mediante voladizos balanceados**

La construcción de un puente mediante el método conocido como voladizos balanceados inicia con las pilas del puente y se continua con la colocación en fases de los segmentos del tablero a ambos lados de la pila, lo que genera una estructura en voladizo autoequilibrante, hasta que se cierra el claro con ayuda de los segmentos que se fueron añadiendo a la pila siguiente. Cada fase esta unida a la siguiente mediante cables postensados incorporados a la estructura final.

El primer intento de aplicar este método constructivo fue en 1929 en la construcción del puente Río Peixe en Brasil utilizando concreto reforzado. Se lograron construir claros de 68 metros, sin embargo el método no prosperó hasta que se mejoraron las técnicas de postensado que permitieron que se construyeran voladizos sin grietas.

Al igual que en otros métodos constructivos, éste puede aplicarse colando *in situ* o utilizando segmentos precolados. La utilización de segmentos precolados trae consigo varias ventajas, como menor tiempo de construcción debido a que es posible iniciar el colado de los segmentos en el área de prefabricación e iniciar con las cimentaciones del puente al mismo tiempo. Las deformaciones del concreto dependientes del tiempo son menos significantes ya que al momento de colocarlas llevan un mayor tiempo de fraguado con respecto al colado *in situ*, sin embargo requiere de cierto volumen de segmentos para que sea económicamente viable debido a que

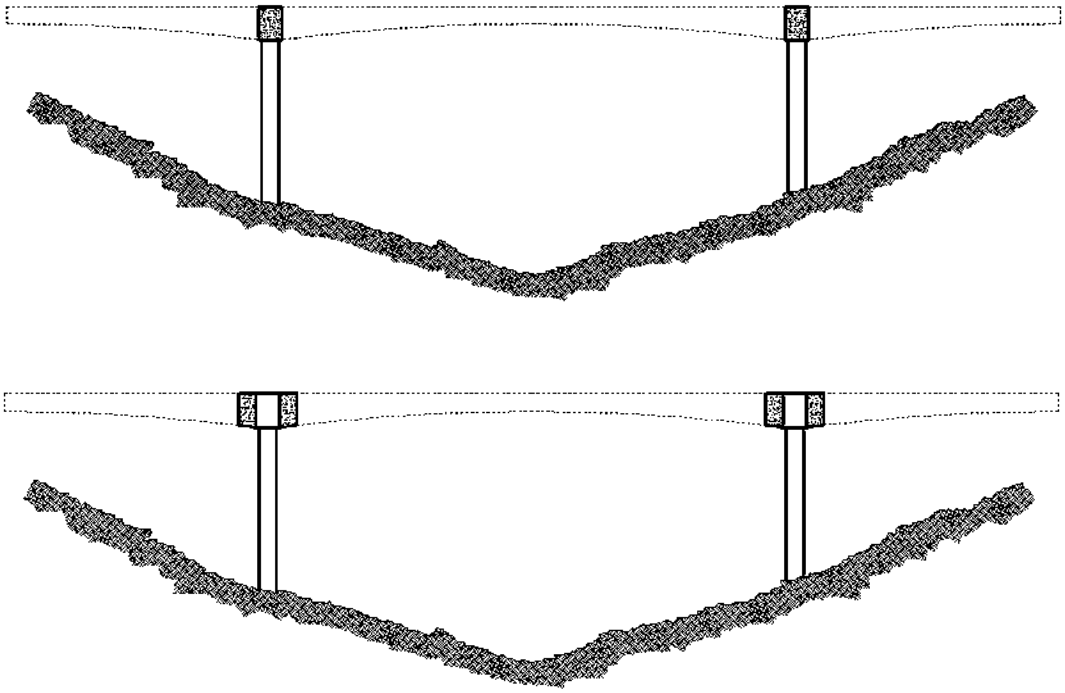
existe una fuerte inversión en el área de prefabricación, moldes, transporte, y maquinaria de erección. Generalmente, con la utilización de segmentos precolados se logra un producto final de mayor calidad.

Desde los años sesentas el método de voladizo balanceado mediante segmentos precolados logro un amplio reconocimiento y ha sido utilizado extensivamente a nivel mundial. Actualmente se construyen puentes de mas de 20 000 segmentos gracias al perfeccionamiento que se ha logrado.

- **Proceso constructivo**

La construcción de puentes de sección cajón unicelulares mediante el método de voladizo balanceado ha sido reconocido como uno de los métodos mas eficientes, sin la necesidad de elementos estructurales temporales para soportar el tablero.

La construcción inicia con las pilas permanentes y se continúa de forma “balanceada” hacia el centro del claro de ambos lados (Figura 2.1.h). Los voladizos generalmente se construyen con segmentos de entre 3 a 6 m de longitud.



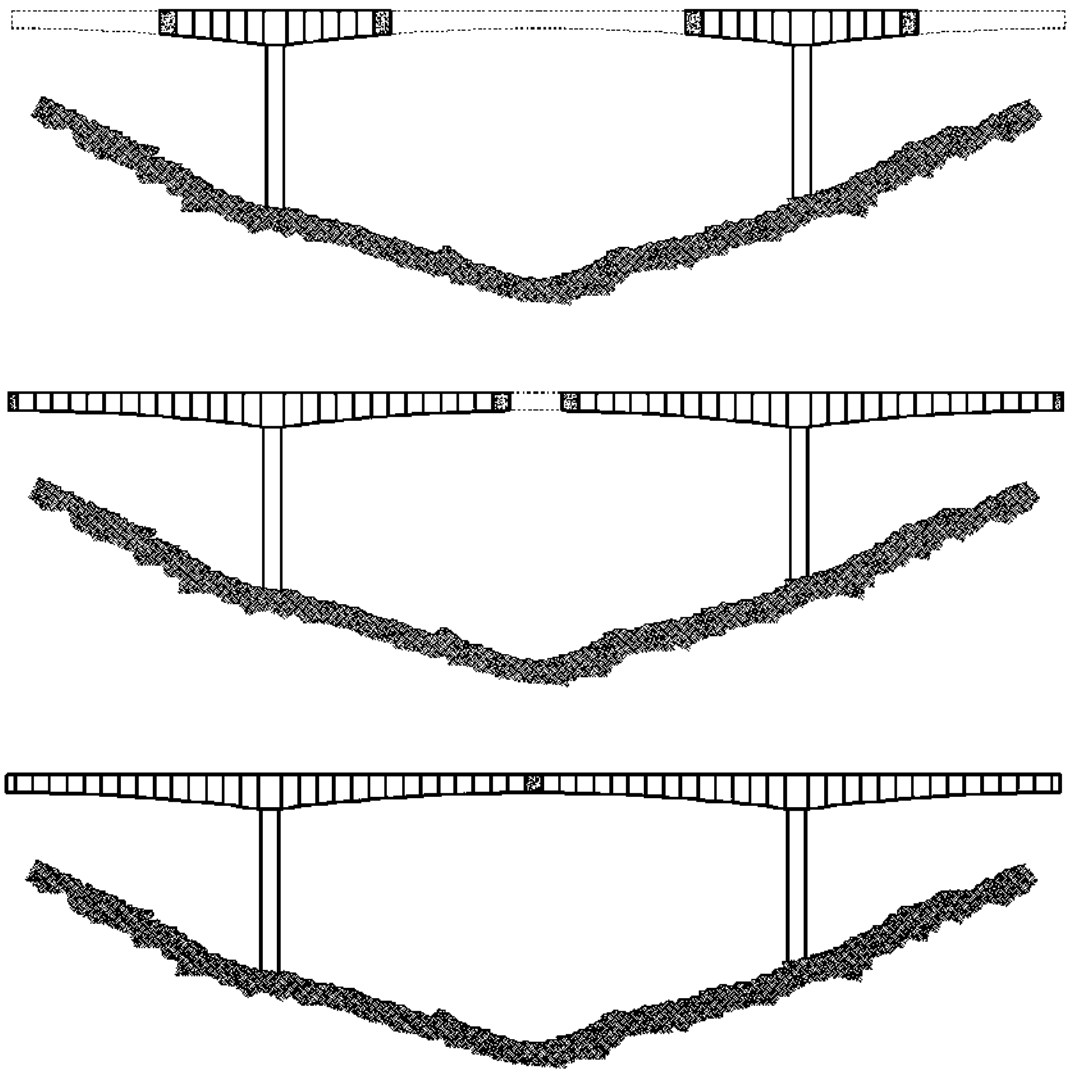


Figura 2.1.h *Proceso constructivo voladizo balanceado.*

- **Configuraciones típicas**

La relación típica claro entre altura del tablero (L/H) para secciones con altura constante esta entre 18 y 22. Sin embargo, secciones con altura menor de 2 m generan dificultades al realizar las maniobras de tensado dentro de la sección. Debido a esto se establece un claro mínimo de entre 25 a 30 m para que el método constructivo sea económico.

Secciones de tablero en cajón unicelulares han resultado ser las más eficientes para el cimbrado, hoy en día secciones en cajón multicelulares son rara vez usadas para este método de construcción. Tener las almas inclinadas mejora la estética del puente pero aumenta la dificultad

de la cimbra al tener una altura de tablero variable a lo largo del puente. El área de la losa inferior de la sección se determina por el modulo de sección requerido para mantener las fibras inferiores de compresión por debajo del máximo permitido en esa ubicación. El espesor de las almas se determina en gran parte por el cortante, con un mínimo de 250 mm cuando no existen ductos internos en la sección para cables de postensado y 300 mm en otros casos.

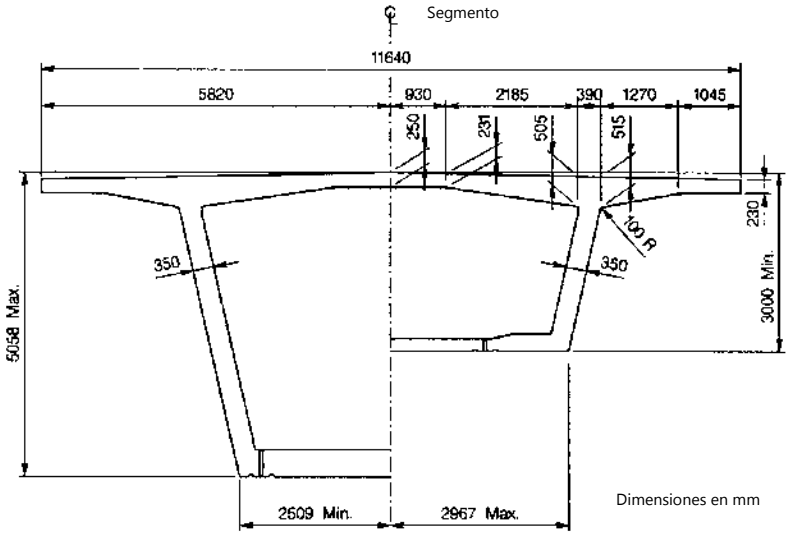


Figura 2.1.i *Sección transversal típica para un puente de altura variable con claro de 93 m.*

- **Configuración típica del postensado**

Los cables de postensado se pueden ubicar dentro de la sección de concreto, o fuera de ella, dentro de tubos de acero ubicados dentro del peralte de la sección en cajón. Un postensado externo simplifica en gran medida el proceso de cimbrado y las excentricidades reducidas disponibles comparadas con el postensado interno generalmente se compensan con perdidas por fricción menores a lo largo de los cables y por lo tanto mayores fuerzas aplicadas. La elección del tamaño de los cables debe hacerse considerando el tamaño de la sección en cajón. Se requiere un número mínimo de cables para el proceso de voladizos balanceados, y estos pueden ser anclados en la cara del segmento, en la parte interna, o en una combinación de ambos. Después de que se logra la continuidad de los voladizos opuestos, el número requerido de cables pueden instalarse en el centro del claro. Dependiendo de la configuración y longitud de los claros, se puede economizar al pasar algunos de los cables a través de dos o mas pilas, desviándose de la parte superior de la pila hasta la parte inferior del centro del claro, de tal forma que se reduce el numero

de anclajes necesarios y operaciones de tensado necesarias. El postensado externo es mejor utilizado en estos cables de continuidad lo que permite corridas de cable mayores debido a las menores pérdidas por fricción. En lugares donde los cables son externos a los elementos de concreto, se utilizan desviadores en las pilas, a un cuarto del claro, y en el centro del claro para lograr el perfil requerido. En las siguientes figuras se muestra la configuración típica del postensado.

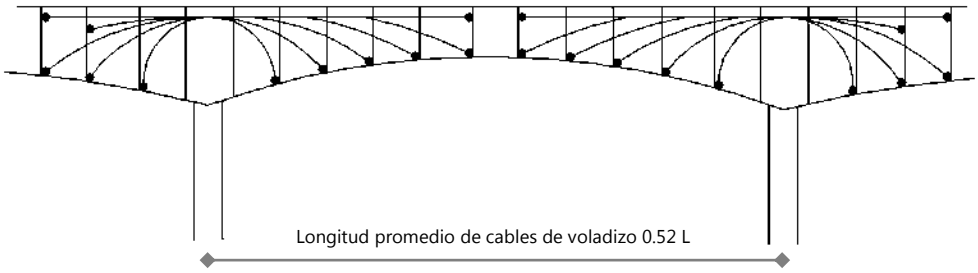


Figura 2.1.j *Configuración típica de cables de voladizo.*

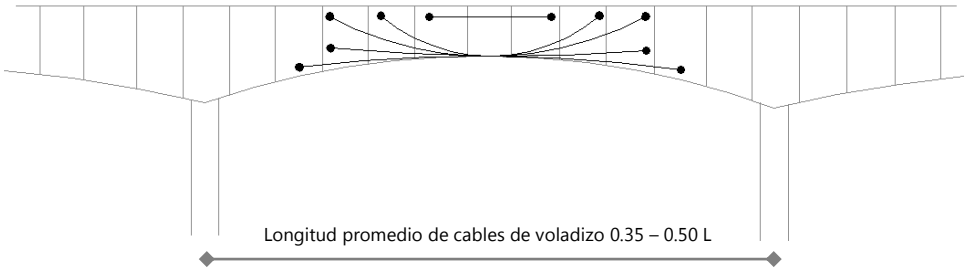


Figura 2.1.k *Configuración típica de cables de continuidad.*

Es importante señalar que actualmente, gracias a las altas resistencias de los materiales logradas, entre otras mejoras, se construyen puentes con claros de hasta 200 m mediante el método de voladizos balanceados cuando se utilizan segmentos precolados y de hasta 250 m cuando se cuelan *in situ*.

2.2. Puentes en arco

Los puentes en arco son de los más antiguos que existen y tienen gran resistencia natural. En vez de dirigirse directamente hacia abajo, el peso del arco se transmite a los extremos a lo largo de la

curvatura del arco hacia los estribos. Los estribos deben ser capaces de resistir las cargas a las que estará sujeto el puente y evitar que las reacciones horizontales provoquen la separación de los extremos o arranques de la estructura.

Cada parte del arco se encuentra en compresión al soportar su peso propio y el peso de los vehículos que lo atraviesa. Por tal motivo es necesario que el material utilizado en su construcción soporte grandes esfuerzos a compresión.

Los puentes en arco modernos son viables para claros entre 200 y 500 m.

- **Tipología de puentes en arco**

Existen varias clasificaciones de puentes en arco, una de las más comunes es de acuerdo con la posición del tablero.

De acuerdo con ésta clasificación existen 3 tipos de puentes en arco; el primero de ellos es el puente de tablero superior (Figura 2.2.a), donde el tablero se apoya en pilas que a su vez están apoyadas encima del arco; el segundo es el puente de tablero intermedio (Figura 2.2.b), donde el tablero se encuentra parcialmente colgado mediante tirantes del arco y parcialmente apoyado sobre pilares; finalmente está el puente de tablero inferior (Figura 2.2.c), en éste el arco se encuentra totalmente por encima del tablero el cual está sujeto mediante tirantes.

Figura 2.2.a *Puente de tablero superior.*

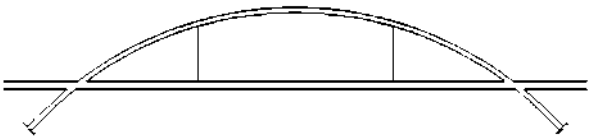


Figura 2.2.b *Puente de tablero intermedio.*

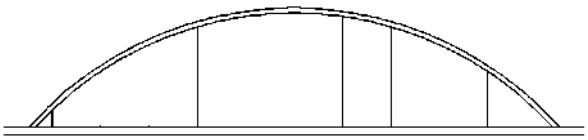


Figura 2.2.c *Puente de tablero inferior.*

Es posible que el tipo de suelo donde se apoyan los extremos del arco, de los dos últimos tipos de puentes, no soporten las reacciones horizontales y tiendan a separarse más los arranques, ocasionando el colapso del puente. Para evitar tal desastre se colocan tirantes a lo largo del tablero uniendo el arco y evitando que se abra.

- **Proceso constructivo**

El proceso constructivo más común en los puentes en arco modernos es el que se analizará en el presente trabajo y que es conocido como construcción mediante voladizos sucesivos con estabilización por tirantes. Comparado con otros métodos constructivos tiene la ventaja de que no es necesaria la colocación de maquinaria ni ninguna estructura provisional directamente debajo del arco. El primer puente construido con éste método es el puente Šibenik en Croacia (Figura 2.2.d). Existen variantes en cuanto al método constructivo pero de forma general el proceso a seguir es el siguiente.

Figura 2.1.d *Puente Šibenik (Tomada de http://en.structurae.eu/photos/index.cfm?JS=15161).*

El proceso constructivo se inicia con la construcción de los estribos, las primeras y últimas pilas así como el tablero que se apoyará en ellas. El arco se construye en tramos de dovelas, colocando primero las dovelas de los arranques. Cada dovela se mantiene colgada mediante dos tirantes los cuales se anclan a la pila más cercana. Para evitar que la pila se vuelque, se ancla al estribo con otros cables adicionales (Figura 2.2.e).

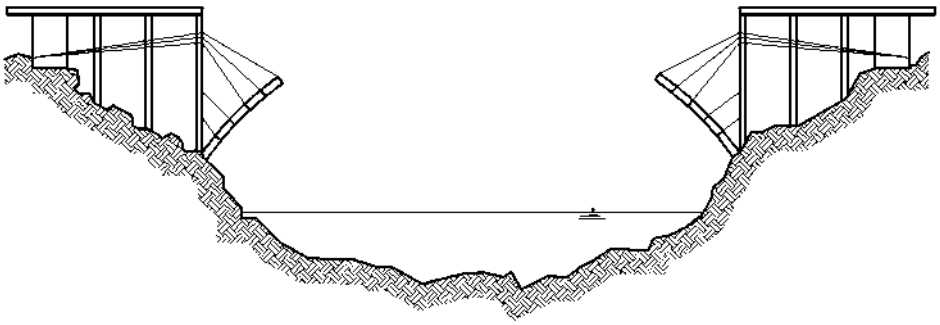


Figura 2.2.e *Colocación de los segmentos extremos del arco.*

Se continúa con el cierre del arco empalmando más dovelas. Debido a la elevación de estas dovelas no es posible que se sostengan de la misma pila que las anteriores, por tal motivo es necesario empelar torres metálicas temporales de donde se sostienen los tirantes. Las torres también se anclan a los estribos (Figura 2.2.f).

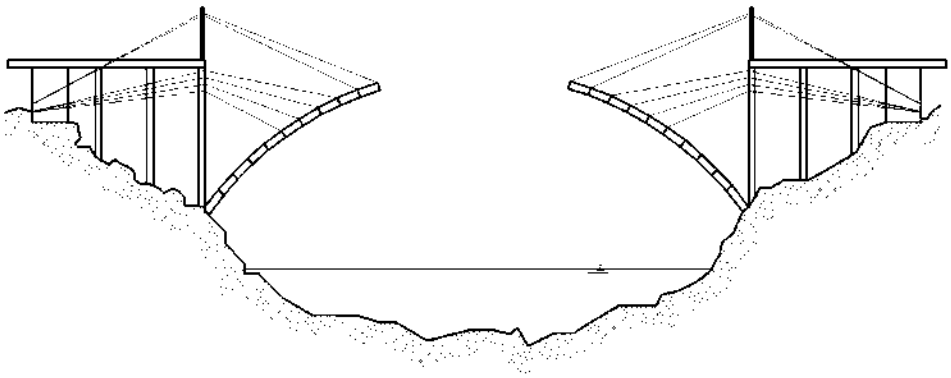


Figura 2.2.f *Colocación de dovelas con torres temporales.*

Si es necesario se emplean otras torres temporales de mayor altura apoyadas en los estribos para continuar con la colocación de las dovelas (Figura 1.2.g). Al ir creciendo el arco se va haciendo más vulnerable tanto en dirección vertical como transversal ante fuerzas como el viento y el sismo.

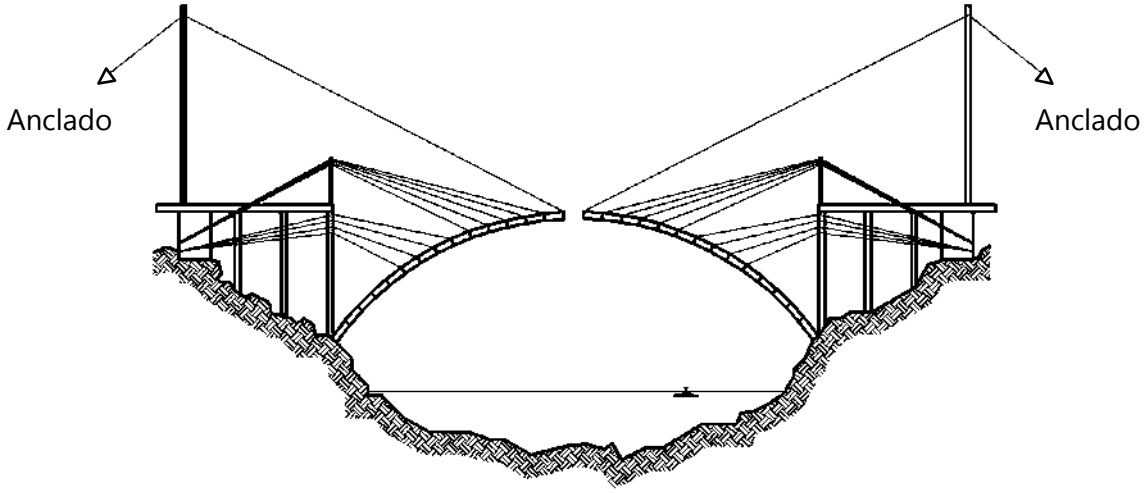


Figura 2.2.g *Configuración antes del cierre del arco.*

Al colocar la última dovela se cierra el arco y adquiere su máxima resistencia. En este momento se retiran las torres temporales así como los tirantes (Figura 2.2.h).

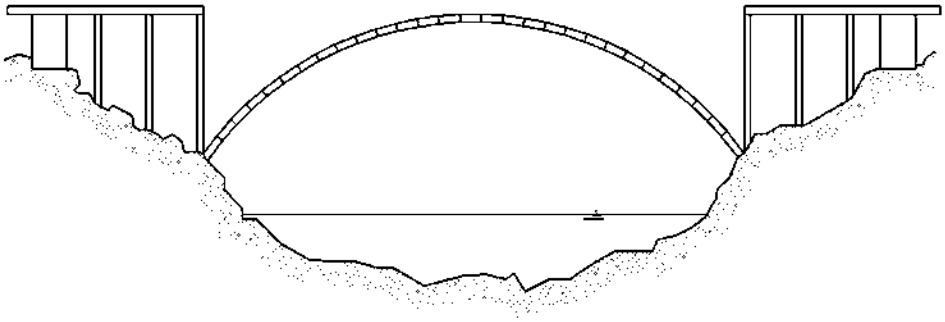


Figura 2.2.h *Cierre del arco.*

Finalmente se construyen las pilas que van apoyadas en el arco para poder cerrar el tablero (Figura 2.2.i). El puente queda terminado, listo para usarse.

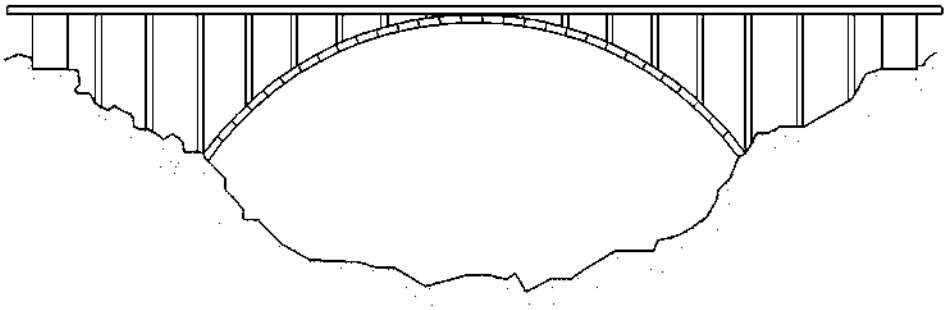


Figura 2.2.i *Construcción de últimas pilas y terminación del tablero.*

2.3. Puentes atirantados

El concepto y aplicación práctica del puente atirantado surge en el siglo XVII, cuando un ingeniero veneciano con el nombre de Verantius construye un puente con varias cadenas en forma diagonal. El concepto era muy atractivo para ingenieros y constructores por varios siglos, sin embargo, debido a falta de materiales apropiados y carencia en conocimientos teóricos, no tuvo gran evolución sino hasta 1950 en Alemania.

Después de la segunda guerra mundial, se estimó que en Alemania Occidental aproximadamente 15 000 puentes habían sido destruidos durante el conflicto. Por lo tanto, durante el periodo de reconstrucción se tuvo la oportunidad de aplicar nuevos conceptos de diseño y construcción. Durante este periodo el acero era escaso y se le dio gran énfasis al diseñar con el menor peso

posible. Como consecuencia de éste énfasis, se desarrolló la teoría de placas ortotrópicas, la cual unida al diseño de puentes atirantados hizo posible la construcción de puentes hasta 40 % más ligeros que sus contrapartes existentes antes de la guerra. Los puentes atirantados fueron el tipo de puente más económico para reemplazar los destruidos debido al uso eficiente de los materiales y a la rapidez de su construcción.

Figura 2.3.a *Puente Strömsund (Tomada de http://star0630.springnote.com/pages/4465355).*

El primer puente atirantado moderno, el Puente Strömsund (Figura 2.3.a), fue terminado en 1955 en Suecia. Fue construido por el ingeniero estructural alemán Franz Dischinger.

Desde entonces ha crecido enormemente el número de puentes atirantado construidos ya que satisfacen muchos puntos clave en la construcción de puentes, tales como economía, facilidad de construcción, y estética. Hoy en día este tipo de puente es viable para claros de 200 a 1000 m.

- **Componentes del puente**

El concepto del puente atirantado es simple. Los tirantes soportan al tablero para que puedan cubrir grandes distancias. La pila o torre, los tirantes y el tablero son los principales componentes de un puente atirantado, en todos predominan los esfuerzos axiales, con los tirantes bajo tensión y el tablero y pila sujetos a compresión.

Actualmente existe una amplia variedad de tirantes que son diseñados para cada puente en específico. Se construyen generalmente de acero gracias a su gran resistencia bajo tensión y pueden estar conformados tanto de barras o de cables sin embargo ya se experimenta con el uso de materiales compuestos. Dos de los cables más comunes se muestran en las Figuras 2.3.b-c.

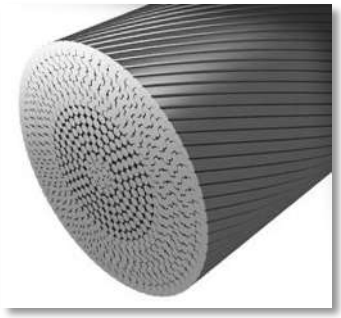


Figura 2.3.b *Cable cerrado (Tomada de http://www.bridon.com/site/products/structural/lockedcoil.php).*

Figura 2.3.c *Cable en espiral (Tomada de http://www.bridon.com/site/products/structural/sprialstrand.php).*

En los cables atirantados, se requieren conexiones especiales que permitan transmitir los esfuerzos del cable a la pila y al tablero. Debido a que la gran resistencia de los cables se debe al alto contenido de carbón, aproximadamente 5 veces mayor que en el acero estructural normal, los cables no pueden ser soldados. Por tal motivo existe una gran variedad de sistemas de anclaje que dependen del tipo de tirante que se use y del lugar de su colocación ya sea en la pila o el tablero, la Figura 2.3.d muestra un ejemplo.

Figura 2.3.d *Sistema de anclaje (Tomada de http://www.vsl.com/index.php?option=com_content&task=view&id=137&Itemid=256).*

La versatilidad del concepto del puente atirantado permite crear una amplia gama de configuraciones geométricas.

El arreglo de los cables, tipo de superestructura, y el estilo de la pila pueden ser fácilmente ajustados para satisfacer los requisitos de cada sitio en específico y mejorar su estética.

En dirección transversal al eje longitudinal del puente se pueden colocar los tirantes en un plano o en dos principalmente. Las configuraciones más comunes se muestran en la Figura 2.3.e. Las configuraciones de un solo plano tienen la ventaja de que son más económicas e invaden menos espacio en el tablero, sin embargo tiene la desventaja de que el tirante transfiere fuerzas

concentradas relativamente grandes al tablero siendo necesaria la utilización de elementos adicionales para rigidizar el tablero y utilizar conexiones más grandes.

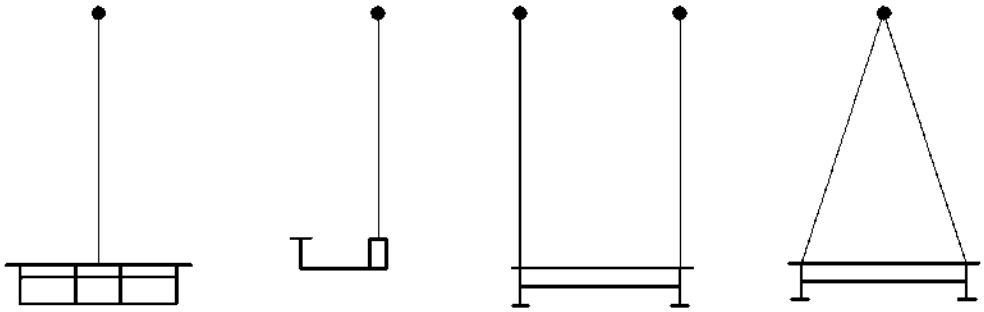


Figura 2.3.e *Arreglo transversal de los tirantes. a) vertical en un plano, b) vertical/lateral en un plano, c) vertical en dos planos, d) inclinado en dos planos.*

En lo que se refiere al arreglo longitudinal de los tirantes existen principalmente 3 arreglos básicos los cuales pueden ser aplicados en arreglos transversales en un plano o en dos. Estos arreglos son conocidos como en arpa, en abanico y el radial (Figura 2.3.d).

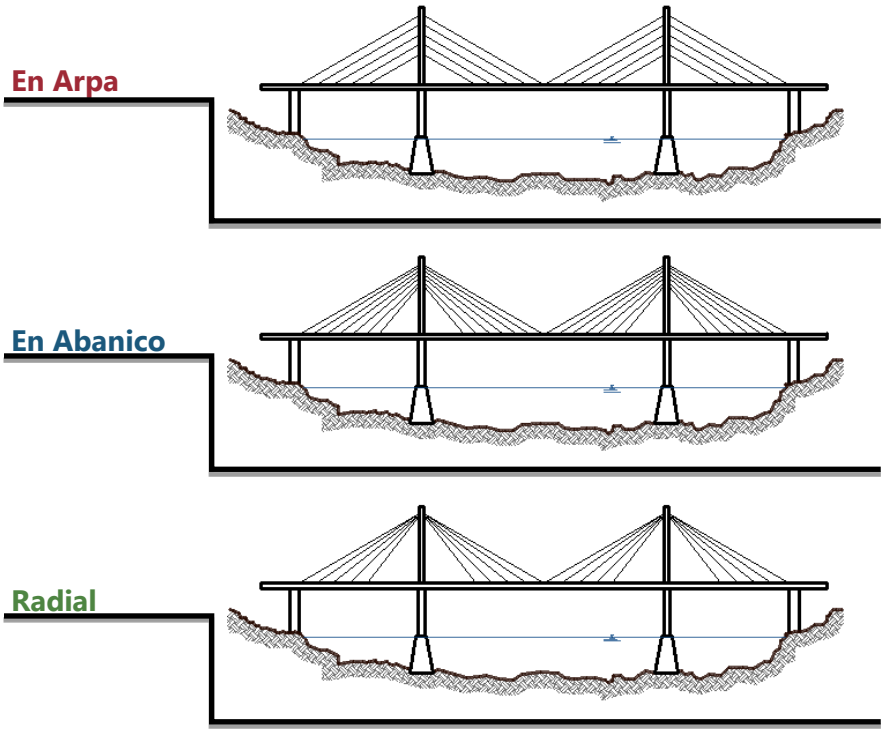
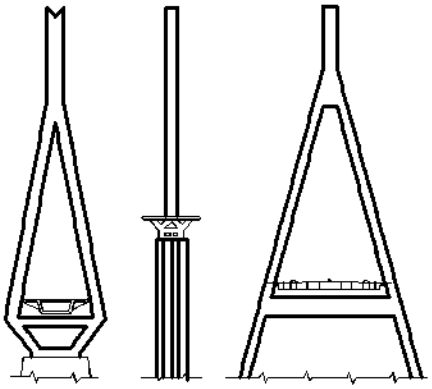
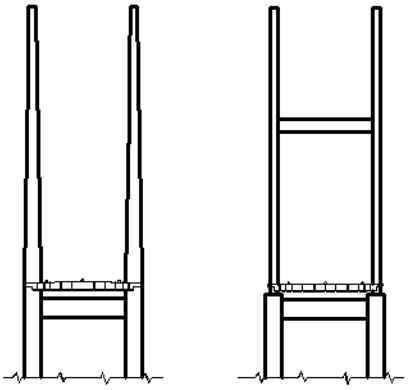


Figura 2.3.e *Arreglos longitudinales de tirantes.*

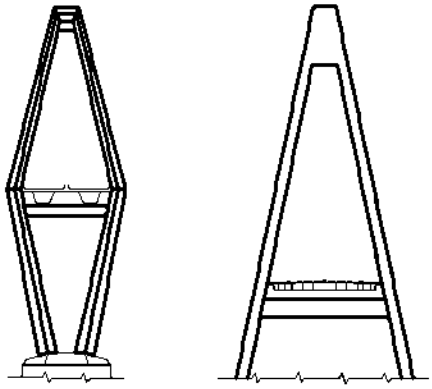
Al igual que el sistema de cables, la configuración de las pilas también es muy variable. Existen de diferentes formas geométricas de tal forma que se puedan ajustar para cada proyecto en específico tomando en consideración el arreglo de los cables, las condiciones del sitio, requisitos de diseño, estética, y economía. Dentro de las más usadas se encuentran las mostradas en la Figura 2.3.f.



Pilas para configuraciones transversales en un plano. En diamante modificada (izquierda), normal (central), en A (derecha).



Pilas para configuraciones transversales en 2 planos verticales. Pilas en H.



Pilas para configuraciones transversales en dos planos inclinados. En diamante (izquierda), en A (derecha).

Figura 2.3.f *Tipos de pilas.*

En cuanto a la configuración del tablero, algunas de las secciones transversales utilizadas son las mostradas en la Figura 2.3.g. Las flechas indican donde va la conexión de los tirantes, se puede observar que algunas son para sistemas de tirantes en un plano (b y d) y otras en dos planos (a y c).

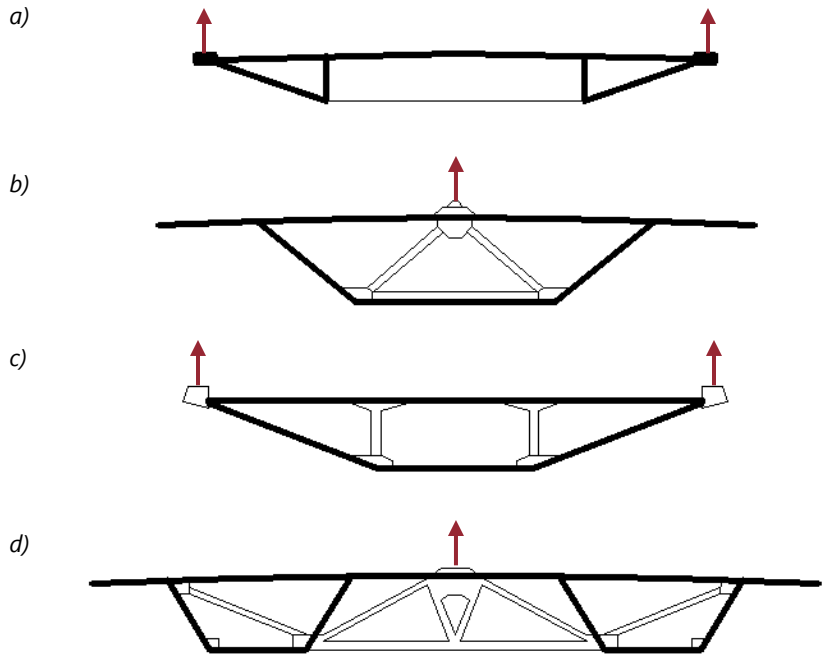


Figura 2.3.g *Secciones transversales comunes del tablero.*

- **Proceso constructivo**

De igual forma que en los otros tipos de puentes existen diferentes procesos constructivos y con diversas variantes, cada uno adecuado para condiciones de sitio específicas. El proceso que se analizará se encuentra dentro de los más utilizados gracias a la rapidez con que se puede construir el puente, y es conocido como construcción mediante voladizos sucesivos. El método consiste en lo siguiente:

El elemento estructural que primero se construye son las pilas donde irán anclados los tirantes (Figura 2.3.h). En los esquemas utilizados para explicar el proceso solo existe una pila central sin embargo puede existir más de una pila y el proceso es, de manera general, el mismo.

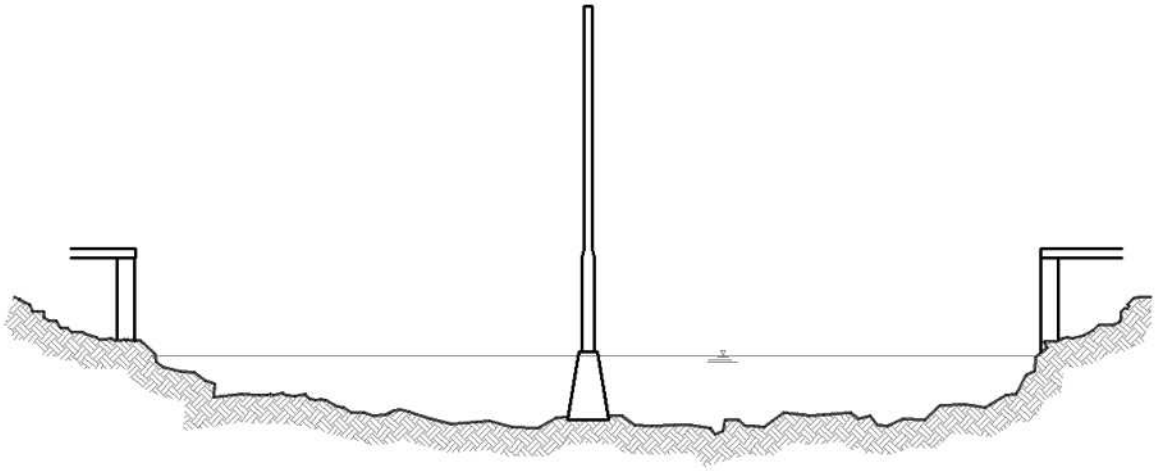


Figura 2.3.h *Construcción de pila central.*

Después de haber construido la pila central se procede a la colocación de los primeros segmentos del tablero, se utiliza una estructura temporal de soporte para hacer posible la unión mediante los tirantes de las dovelas con la pila central (Figura 2.3.i). Durante ésta etapa es posible que se requiera la colocación de tirantes provisionales para tener más estabilidad en la pila. Los tirantes provisionales irían colocados desde la parte superior de la torre hacia los estribos.

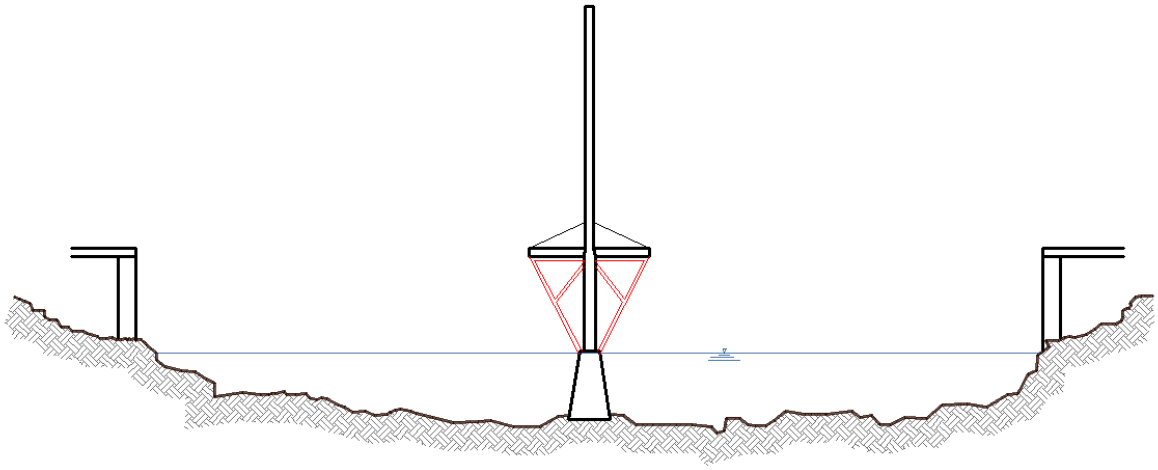


Figura 2.3.i *Colocación de los primeros segmentos del tablero.*

A partir de esta etapa, la construcción del resto del tablero mediante segmentos o dovelas es un proceso repetitivo que de forma general se describe en las siguientes etapas:

1. Traslado del carro de avance (ver Figuras 2.3.k-l).

2. Posicionamiento de dovelas prefabricadas izadas desde una barcaza (ver Figura 2.3.j). Existe la posibilidad de izar la dovela prefabricada completa, o sólo una parte, colando el resto sobre el tablero del puente. También es posible colar directamente en el puente las dovelas, aunque es el caso menos frecuente. Cada segmento es preesforzado y entre cada uno de ellos es opcional colocar un adhesivo epoxi que sirve para lubricar la superficie, disminuir los efectos de las imperfecciones de las juntas entre las mismas, impermeabilizar la junta y contribuir para la transmisión de las tensiones provenientes de los esfuerzos cortantes (Ytza, 2009).
3. Se tensan parcialmente los tirantes extremos. En algunos casos es necesario utilizar tirantes auxiliares que se conectan directamente al carro de avance para evitar deflexiones excesivas del tablero y reducir los momentos flexionantes que se producen durante la construcción. En ocasiones también es necesario tensar los cables anteriores.
4. Si no se izó la dovela completa, sino solamente piezas prefabricadas, en esta etapa se procede a colar el resto de los elementos para formar el segmento completo.
5. Se procede a realizar el tensado definitivo de los últimos cables.

Figura 2.3.j *Levantamiento de un segmento de tablero (Tomada de http://www.dormanlongtechnology.com/images /SutongDeckLift.jpg).*

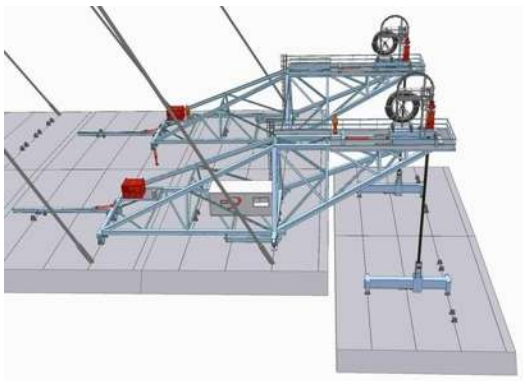


Figura 2.3.k *Sistema de izaje renderizado (Tomada de http://www.dormanlongtechnology.com/images/Sutong_ DEG_02a.jpg).*

Figura 2.3.l *Sistema de izaje (Tomada de http://www.dormanlongtechnology.com/en/projects/shanghai-yangtze.htm).*

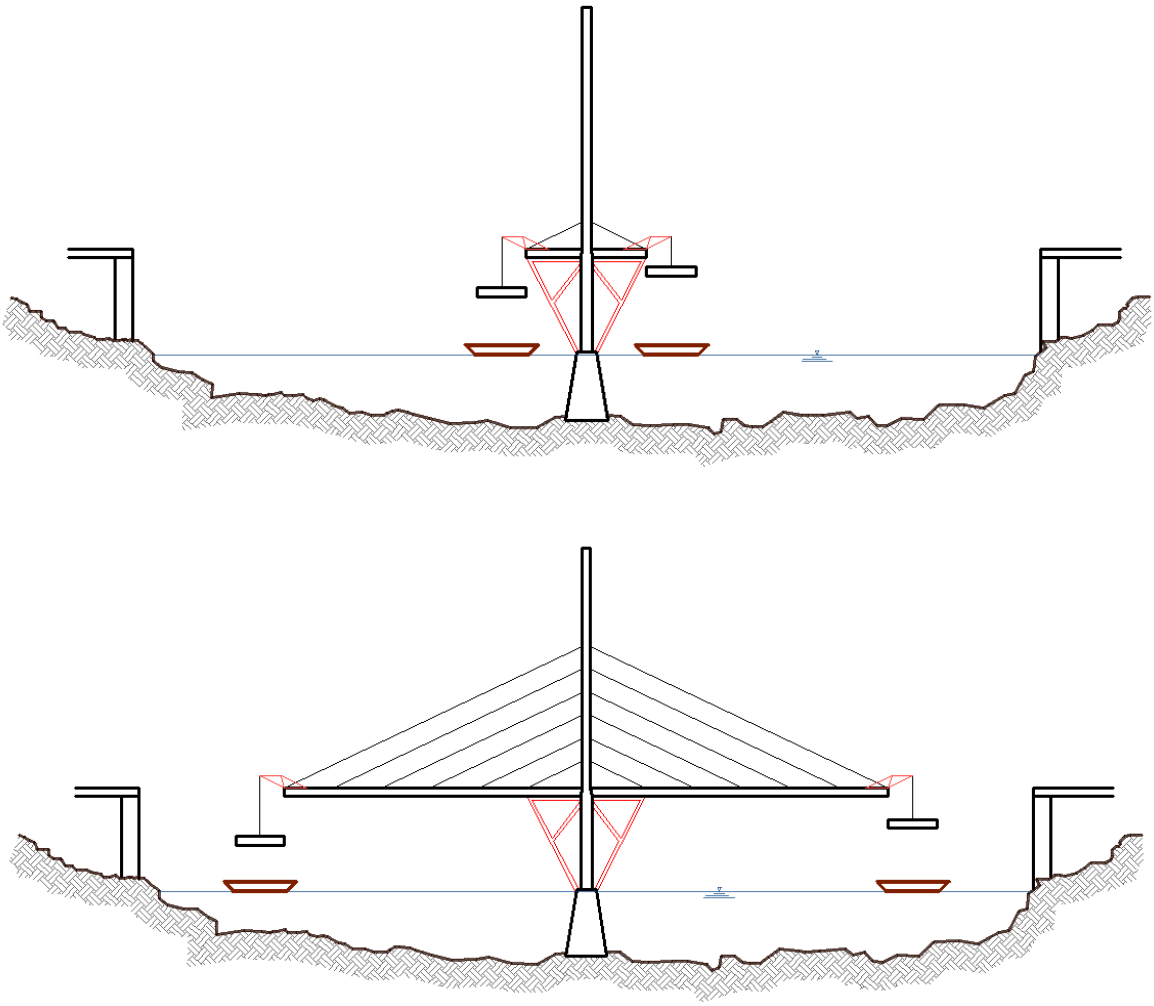


Figura 2.3.m *Colocación de segmentos del tablero.*

Por últimos, después de haber finalizado la construcción del tablero, se anclan los extremos del tablero a los estribos.

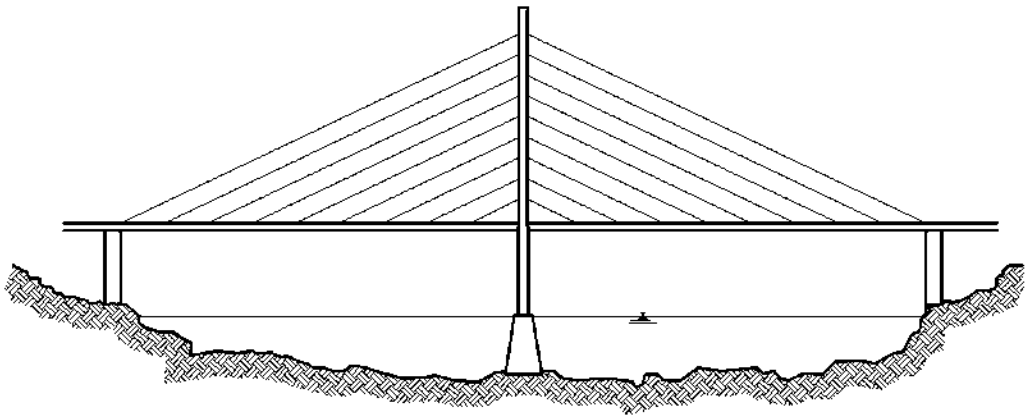


Figura 2.3.n *Puente atirantado terminado.*

Capítulo 3 Espectro de respuestas verticales

3.1. Características de la componente vertical de los sismos

Es un hecho conocido por todos, que al ocurrir un sismo toda estructura civil se ve sometida a un movimiento terrestre tridimensional. Sin embargo, solo el movimiento horizontal se ha estudiado extensivamente dado que, en general, es ésta componente la que mayor daño causa en las edificaciones, lo que da como resultado que las componentes horizontales son las únicas que se consideran en el diseño, y solo en casos especiales se incluye la componente vertical como un porcentaje de la horizontal.

Una de las primeras investigaciones sobre la componente vertical fue realizada por Newmark et al. (1973) donde se propuso que la componente vertical debía estimarse como 2/3 del valor máximo de la componente horizontal. Esta propuesta se basa en los resultados de obtener los cocientes de las aceleraciones máximas del terreno de la componente vertical entre la horizontal (V/H) de 33 registros de Estados Unidos.

En la actualidad se sabe que la regla de 2/3 para calcular V/H es poco conservadora para eventos símicos con epicentro cercano y muy conservadora para distancias epicentrales grandes. En estudios realizados por Collier y Elnashai (2001), se confirmó que el cociente V/H es mayor que 1.0 para un radio menor de 5 km de la fuente sísmica, y mayor de 2/3 para un radio menor de 25 km y dependiente de la magnitud del sismo. En la tabla 3.1 se muestran las relaciones V/H para algunos sismos ocurridos en distintas zonas del mundo.

Evento sísmico	Estación	Horizontal 1 (g)	Horizontal 2 (g)	Vertical (g)	V/H
Gazli, Uzbeksitan 1976	Karakyn	0.71	0.63	1.34	1.89
Imperial Valley, EE UU 1979	El centro array 6	0.41	0.44	1.66	3.77
Nahhani, Canada 1985	Sitel	0.98	1.10	2.09	1.90
Morgan Hill, EE UU 1984	Gilroy array 7	0.11	0.19	0.43	2.25
Loma – Prieta,	LGPC	0.56	0.61	0.89	1.47

EE UU 1989					
Northridge, EE UU 1994	Arleta fire station	0.34	0.31	0.55	1.61
Kobe, Japan 1995	Port Island	0.31	0.28	0.56	1.79
Chi Chi, Taiwan 1999	TCU 076	0.11	0.12	0.26	2.07

Tabla 3.1.a *Cociente V/H de sismos importantes* (Shrestha, 2009).

Un par de años después, Rosenblueth (1975) identificó que este cociente no es constante sino que está en función del periodo de la estructura.

Desde entonces diversos autores han realizado propuestas de los cocientes de aceleración vertical a horizontal, como los que se muestran en la tabla siguiente, donde R corresponde a la distancia entre el epicentro y el sitio, M a la magnitud del sismo y A_V a la aceleración vertical.

Referencia	Características de los Registros	V/H
Newmark et al., 1973	33 registros de EE.UU	2/3
Kawashima et al., 1985	Registros de Japón	1/5
Ambrasays y Simpson, 1995	104 registros mundiales, R<15 Km, M>6, A_V>0.1g	1.75
Boomer y Martinez, 1996	130 registros, A_V>0.2g	1.00
Mohammadioum, 1996	Suelos aluviales cercanos a la falla	0.75

Tabla 3.1.b *Cocientes de aceleración vertical a horizontal propuestos* (Perea & Esteva, 2005).

Para poder comprender mejor el efecto de la componente vertical es necesario conocer a que distancias de la falla es más significativa. En la siguiente figura, realizada con todos los registros sísmicos con magnitud mayor a 6.0 del conjunto de registros seleccionados y descritos con mayor detalle más adelante, se observa como disminuye gradualmente la relación aceleración máxima vertical / aceleración máxima horizontal al incrementar la distancia a la falla, indicando que la componente vertical es más severa a distancias cercanas a la falla. Este comportamiento es más significante mientras mayor es la magnitud de los registros. También se observa que la relación 2/3 es superada en varios escenarios.

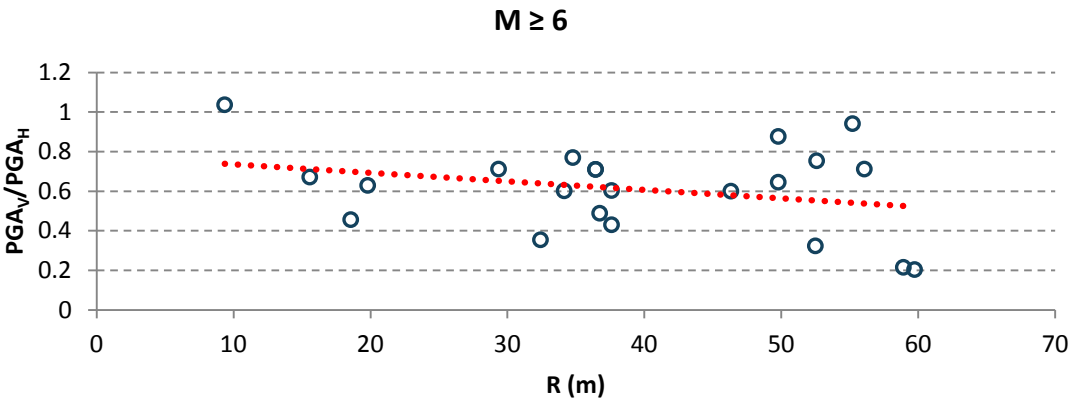


Figura 3.1.a *Relación PGA_V/PGA_H vs Distancia Epicentral (R).*

- **Arribo de las ondas**

Gráficas de la aceleración del terreno en la historia del tiempo generalmente demuestran que para periodos cortos la componente vertical se encuentra fuera de fase (llega antes) con respecto a los movimientos horizontales, mientras que para periodos largos las tres componentes llegan aproximadamente al mismo tiempo. Existe una excepción a este patrón cuando el terreno está conformado por roca. En este tipo de terreno, las tres componentes, llegan en un tiempo similar en sismos de campo cercano (aproximadamente 10 km).

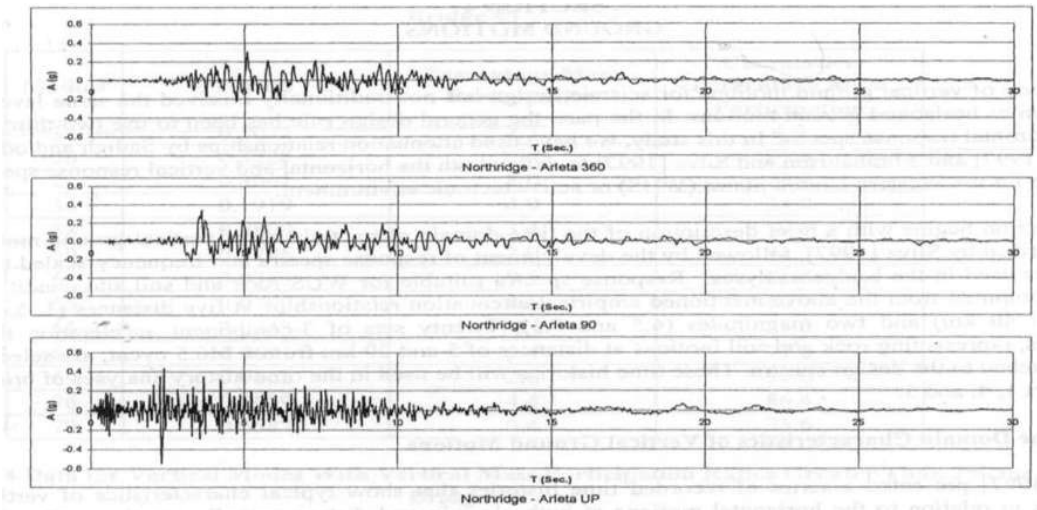


Figura 3.1.b *Aceleración del terreno en la historia del tiempo, registro Northridge-Arleta*

(Button, Cronin, & Mayes, 1999).

Silva (1997) atribuye la llegada temprana de la componente vertical en periodos cortos a que prevalecen las ondas de compresión en la componente mencionada. El dominio de las ondas de compresión se debe al hecho de que la energía de las ondas de cortante no se proyectan significativamente a la componente vertical debido a la refracción severa generada en los cambios de medio terreno blando/duro (llegando a ángulos de incidencia casi verticales en la superficie libre) y a la gran amplificación de las ondas de compresión cerca de la superficie. En sitios con terreno rocoso y de campo cercano, se espera que las ondas SV inclinadas dominen los movimientos verticales y sean responsables de la excepción mencionada en el párrafo anterior. Sin embargo, para distancias mayores (mayores de 10 a 20 km), las ondas de compresión de nuevo tienden a dominar en la componente vertical debido a que las ondas SV se encuentran más allá de su ángulo crítico por lo que no se propagan a la superficie efectivamente.

- **Efecto del tipo de terreno**

Adicionalmente, Silva (1997), encontró que la relación V/H es directamente proporcional con la magnitud del sismo y que para periodos mayores de entre 0.2 a 0.3 segundos, la relación V/H se reduce a menos que la comúnmente usada de 2/3. Lo descrito anteriormente se puede observar en la Figura 3.1.c, donde la línea horizontal de mayor grosor marca el valor de 2/3 de la relación V/H usado comúnmente. También reveló que la distancia al epicentro y la magnitud de los sismos afectan menos a terrenos rocosos que a los blandos, como se observa claramente en las siguientes dos figuras. En la Figura 3.1.c, la cual se realizó teniendo terreno rocoso, se observa que el valor máximo de la relación V/H es de aproximadamente 1.3, mientras que en la Figura 3.1.d, la cual representa terreno blando, se tiene un valor máximo de la relación V/H de más de 2.5.

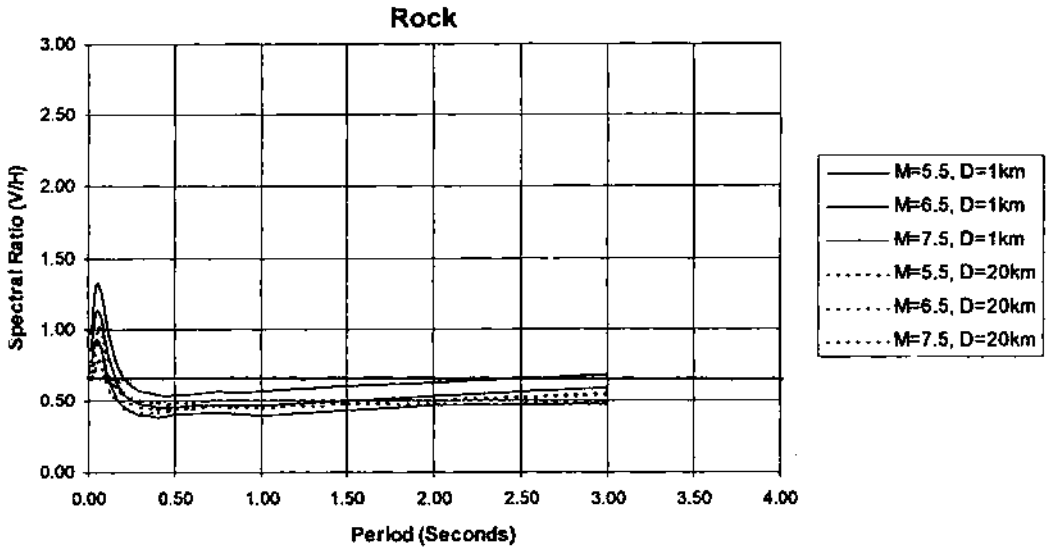


Figura 3.1.c *Dependencia de la magnitud en la relación espectral V/H a distancias de 1 y 20 km de la falla* **(Button, Cronin, & Mayes, 1999)**.

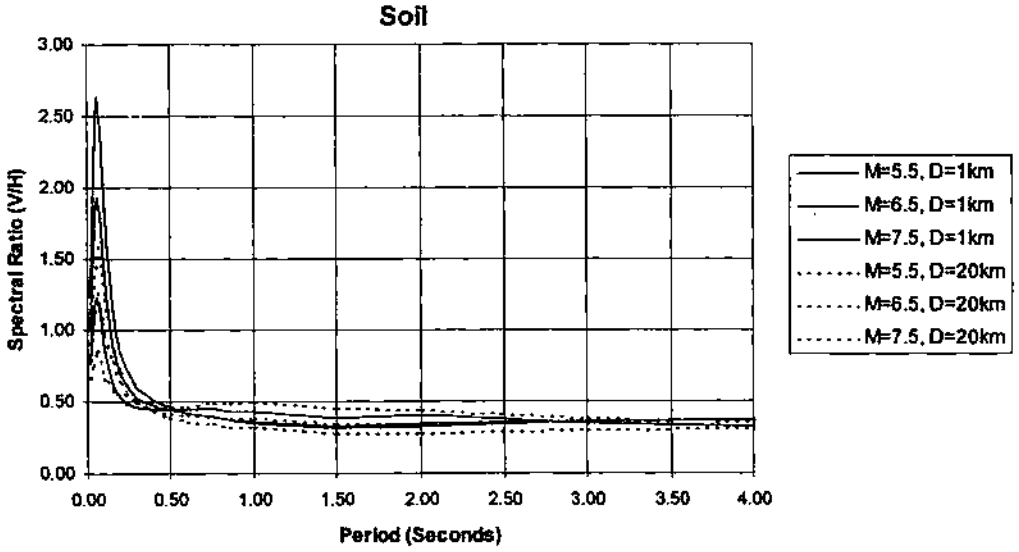


Figura 3.1.d *Dependencia de la magnitud en la relación espectral V/H a distancias de 1 y 20 km de la falla* **(Button, Cronin, & Mayes, 1999)**.

- **Normas, códigos y reglamentos**

A nivel mundial existe una gran cantidad de normas, códigos y reglamentos de construcción los cuales consideran de diferente manera los efectos de la componente vertical de los sismos.

En la Tabla 3.1.c se muestra un resumen comparativo sobre las consideraciones reglamentarias para la componente sísmica vertical en los códigos nacionales e internacionales más importantes. En el apartado correspondiente a México se observa que se hace referencia a dos de los reglamentos más utilizados en el país, el primero es el capítulo 3 del Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo, publicado por la Comisión Federal de Electricidad y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (MDOC, 2008) y el segundo corresponde a las Normas Técnicas Complementarias, Diseño por Sismo, del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTCDS-RCDF, 2004). Como se muestra en la tabla, solo el primero considera la componente sísmica vertical.

Con la finalidad de tener expresiones comparables se ha decidido utilizar la siguiente nomenclatura en la tabla 3.2: F_H y F_V son las fuerzas de inercia que producen las componentes horizontal y vertical, respectivamente; C_H y C_V son los coeficientes sísmicos para las componentes horizontales y verticales, respectivamente; $A_H \cdot T_H$ y $A_V \cdot T_V$ son las aceleraciones del espectro de diseño de la componente horizontal y vertical , respectivamente; I es un factor que depende de la importancia del edificio; CM y CV son las cargas muertas y vivas instantáneas.

País	Referencia	Método Estático	Método Dinámico
USA	UBC, 1990	$\uparrow F_v = 0.7 \cdot C_H \cdot I \cdot CM$ Voladizos en zonas sísmicas 3 y 4 $\uparrow F_v = 0.2 \cdot CM$ Vigas, voladizos y presforzados	$A_V \cdot T_V = 2 \cdot A_H \cdot T_H / 3$ Considerar modos con m*>90%
	FEMA-368, 2000	$\updownarrow F_v = 0.2 \cdot C_V \cdot CM$ Vigas de edificios	$A_V \cdot T_V = 2 \cdot A_H \cdot T_H / 3$ Otras estructuras
México	MDOC, 2008		$A_V \cdot T_V = C_{V/H} \cdot A_H \cdot T_H$

	NTCDS-RCDF, 2000	$\updownarrow F_V = 1.4\cdot (0.05/T_v)^{2/3}\cdot F_H$ $T_V \geq 0.05$ $\updownarrow F_V = 1.4\cdot F_H$ $T_V < 0.05$ No Aplica	$C_{V/H} = 2/3$; $C_{V/H} = 3/4$ No Aplica
Chile	INN, 1989	No Aplica	No Aplica
Europa	CEN, 2008	$\updownarrow F_V$ se obtiene de un espectro de respuesta el cual depende del T_v	$\updownarrow F_V$ se obtiene de un espectro de respuesta el cual depende del T_v
China	GBJ-11, 1989	$\updownarrow F_{Vi} = F_V\cdot\frac{CM_i+CV_i\cdot H_i}{(CM+CV)\cdot H}$ Edificios altos, Chimeneas, etc. $F_V = 0.65\cdot C_H\cdot 0.75\cdot (CM+CV)$ Cubiertas L>24m, Volados, etc. $F_V = C_V\cdot (CM+CV)$	No Aplica
Japón	BSLEO, 1981	No Aplica	No Aplica
	SSCECJ, 1980	No Aplica	No Aplica
	AIJ, 1990	$\updownarrow F_V = 0.5\cdot C_H\cdot (CM+CV)$	$A_V\cdot T_V = 0.5\cdot A_H\cdot T_H$
Nueva Zelanda	NZS-4203, 1992	No Aplica	No Aplica

Tabla 3.1.c *Resumen comparativo de las consideraciones reglamentarias para la componente vertical sísmica en código sísmicos mundiales. Adaptada de* (Perea & Esteva, 2005).

Es importante destacar de la tabla anterior que solamente el Eurocódigo (CEN, 2008) y el Manual de Obras Civiles (MDOC, 2008) propone un coeficiente sísmico que depende del periodo de vibración vertical para estimar la demanda sísmica vertical, a pesar que desde 1975 Rosenblueth señaló la influencia del periodo de la estructura. Ademas, llama la atención que reglamentos de paises con un reconocido nivel de sismicidad y riesgo sísmico, como lo son Chile, Japón y Nueva Zelanda, no presenten nunguna consideracion para incluir el efecto de la componente vertical.

Hoy en día existen varias propuestas para tomar en cuenta la componente vertical en función del periodo de la estructura, como la propuesta de Perea y Esteva, 2005. Sin embargo, en la practica actual de diseño se continúa obteniendo el coeficiente vertical como factor del horizontal sin importar las diferencias entre los periodos correspondientes a cada dirección ni las otras variables que intervienen en el fenómeno.

3.2. Componente vertical en sismos mexicanos

Se obtendrá el efecto de la componente vertical de sismos registrados en México, considerando la influencia de las variables que afectan la magnitud de dicha componente. A continuación se describen las características consideradas.

- **Registros seleccionados**

Se seleccionaron los siguientes 100 registros sísmicos de la Base Mexicana de Sismos Fuertes (BMSF) los cuales fueron obtenidos de un total de 42 sismos. En cuanto a la clasificación de los sismos, están conformados por 38 sismos de subducción (mostrados en rojo en la Figura 3.2.a) y los 4 restantes de fallamiento normal (mostrados en amarillo en la Figura 3.2.a).

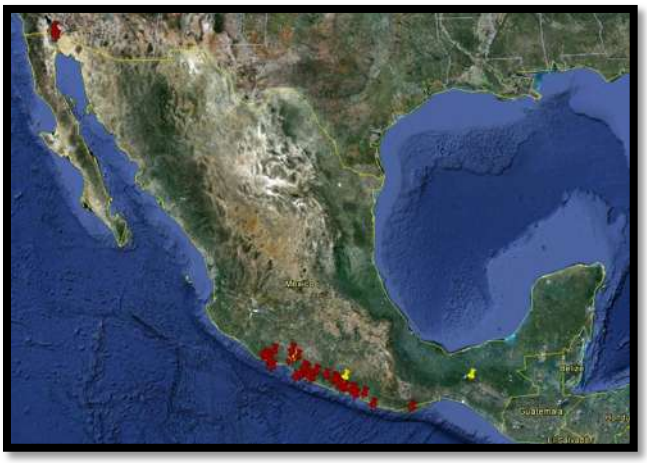


Figura 3.2.a *Ubicación en México de los sismos seleccionados.*

En la siguiente tabla se presenta los 100 registros sísmicos seleccionados con alguna de la información recopilada de cada uno. Los primero 21 registros corresponden a los sismos de fallamiento normal y el resto a los de subducción.

No.	Fecha	Clave Est.	Maginitud	Distancia	Tipo Suelo	Profundidad
1	21-06-99	AZIH	6.2	51.225	Roca	54
2	10-12-94	BALC	6.3	36.442	Roca	20
3	29-07-93	NUXC	5	22.326	Roca	43
4	21-05-91	VIGA	5	41.293	Roca	39
5	29-07-93	SUCH	5	17.065	Roca	43
6	29-12-99	AZIH	5.1	51.953	Roca	82
7	21-06-99	INMD	6	37.61	Brechas y Conglomerados	54
8	29-12-99	INMD	5.9	37.273	Brechas y Conglomerados	82
9	21-06-99	INMI	6	37.61	Brechas y Conglomerados	54
10	29-12-99	INMI	5.9	37.273	Brechas y Conglomerados	82
11	21-06-99	INPT	5.8	37.61	Brechas y Conglomerados	54
12	29-12-99	PT00	5.9	46.461	Conglomerado Sobre Lutitas	82
13	29-12-99	PTSU	5.9	46.461	Conglomerado Sobre Lutitas	82
14	21-10-95	RIXC	6.5	52.512	Calizas	98
15	21-06-99	UNIO	5.8	9.046	Roca	54
16	29-12-99	UNIO	5.1	13.89	Roca	82
17	21-06-99	VILD	6	49.787	Brecha Andesitica	54

18	21-06-99	VILE	5.8	51.444	Roca	54
19	29-12-99	VILE	5.1	55.596	Roca	82
20	21-06-99	VILI	6	49.787	Brecha Andesitica	54
21	29-12-99	VILI	5.9	54.175	Brecha Andesitica	82
22	16-01-97	CALE	5.1	14.73	Roca	25
23	07-02-87	VCPS	5.4	5.545	Rocas volcanicas no diferenciadas	6
24	15-10-79	IAGS	6.6	2.792	Sedimentos	10
25	09-07-80	VICS	6.1	9.366	Sedimentos	12
26	08-10-89	ACAC	5	53.943	Arena - Limo - Arcilla	36
27	04-04-90	ACAC	5	55.664	Arena - Limo - Arcilla	15
28	25-04-89	ACAD	6.5	58.936	Limo Arenoso	19
29	02-05-89	ACAD	5.1	46.681	Limo Arenoso	13
30	09-11-89	ACAD	5.1	24.854	Limo Arenoso	10
31	19-03-78	ACAP	5.8	25.119	Roca Granitica	36
32	13-01-90	ACAR	5	22.839	Aluvial	12
33	29-01-90	ARTG	5.1	28.452	Roca	39
34	31-05-90	ATYC	5.5	50.51	Roca	16
35	08-02-88	AZIH	5	33.861	Roca	19
36	23-04-96	AZIH	5.3	56.697	Roca	17
37	18-07-96	AZIH	5.1	27.954	Roca	20
38	19-09-85	CALE	8.1	19.815	Roca	15
39	29-10-85	CALE	5.1	55.68	Roca	20
40	30-04-86	CALE	6.4	32.431	Roca	20
41	05-05-86	CALE	5.6	34.407	Roca	20
42	03-02-98	HUIG	6.4	29.377	Cuarzomonzita	33
43	14-09-95	COPL	7.3	34.154	Roca	22
44	31-03-93	MAGY	5.3	51.904	Roca	8
45	19-05-90	PAPN	5.1	34.292	Roca	5
46	10-03-89	PETA	5	22.057	Roca	18
47	30-10-95	PNTP	5.3	47.974	Limo Arenoso	27
48	25-02-96	PNTP	5.4	54.614	Limo Arenoso	17
49	29-10-94	POZU	5.1	31.197	Granite	24
50	16-05-98	SLUI	5.1	48.87	Roca	14
51	24-10-93	SMR2	6.5	52.6	Roca	19
52	13-03-96	SMR2	5.1	45.023	Roca	18

53	11-05-90	SUCH	5.3	28.995	Roca	12
54	21-09-85	UNIO	7.5	34.794	Roca	15
55	14-01-91	UNIO	5.1	16.762	Roca	25
56	11-03-93	VILE	5.1	59.873	Roca	12
57	15-07-96	ZIIG	6.5	36.753	Cuarzomonzonita	20
58	10-12-94	BALC	6.3	36.442	Roca	20
59	21-09-85	AZIH	7.5	46.333	Roca	15
60	08-02-88	BALC	5	57.561	Roca	19
61	08-02-88	LLAV	5	42.097	Roca	19
62	10-03-89	LLAV	5	33.443	Roca	18
63	10-03-89	MAGY	5	54.934	Roca	18
64	10-03-89	PAPN	5	14.059	Roca	18
65	10-03-89	SLUI	5	28.525	Roca	18
66	10-03-89	SUCH	5	53.389	Roca	18
67	25-04-89	ACAC	6.5	55.211	Arena - Limo - Arcilla	19
68	29-10-94	ACAC	5.1	14.126	Arena - Limo - Arcilla	24
69	04-04-90	ACAD	5	59.339	Limo Arenoso	15
70	29-10-94	ACAN	5.1	11.863	Granito Alterado	24
71	25-04-89	ACAR	6.5	56.089	Aluvial	19
72	04-04-90	ACAR	5	55.899	Aluvial	15
73	25-04-89	ACAS	6.5	59.761	Aluvial	19
74	10-03-89	ATYC	5	23.317	Roca	36
75	08-10-89	COYC	5	28.049	Roca	36
76	09-11-89	COYC	5.1	48.436	Roca	10
77	13-01-90	CPDR	5	5.66	Roca	12
78	11-03-93	INMD	5.1	18.22	Brechas y Conglomerados	12
79	31-05-90	MAGY	5.5	45.043	Roca	16
80	13-01-90	MSAS	5	27.712	Roca	12
81	08-10-89	OCLL	5	39.663	Roca	36
82	09-11-89	OCLL	5.1	32.336	Roca	10
83	31-05-90	SLUI	5.5	18.373	Roca	16
84	13-01-90	SMR2	5	24.056	Roca	12
85	11-03-93	UNIO	5.1	37.161	Roca	12
86	04-04-90	VIGA	5	18.865	Roca	15
87	02-05-89	VNTA	5.1	45.224	Roca	13

88	09-11-89	VNTA	5.1	19.922	Roca	10
89	02-05-89	XALT	5.1	55.278	Roca	13
90	13-01-90	XALT	5	31.94	Roca	12
91	18-07-96	NUXC	5.1	59.705	Roca	20
92	15-07-96	PAPN	6	18.572	Roca	20
93	18-07-99	PAPN	5.1	28.973	Roca	20
94	16-05-98	PET2	5.1	32.532	Roca	14
95	23-04-96	PETA	5.3	59.236	Roca	17
96	15-07-96	PETA	6	15.577	Roca	20
97	18-07-96	PETA	5.1	7.542	Roca	20
98	13-03-96	VIGA	5.1	31.063	Roca	18
99	08-02-88	PAPN	5	22.183	Roca	19
100	23-04-96	ZIIG	5.6	56.845	Cuarzomonzonita	17

Tabla 3.2.a *Datos de los 100 registros sísmicos seleccionados.*

Cada uno de los registros sísmicos cumple con las siguientes características:

- Distancia Epicentral (R):

  $0 < R < 60$ Km

- Magnitud:

  $M > 5$

De cada registro sísmico se recopiló la siguiente información de cada una de sus componentes sísmicas:

INFORMACIÓN DE LOS REGISTROS SELECCIONADOS										
Fecha	**Clave Est.**	**Dirección**	**M**	**PGA**	**PGD**	**PSA**	**PSD**	**Distancia**	**Tipo Suelo**	**Prof.**
10-02-97	CALE	V	5.1	51.68	11.01	147.27	11.10	14.73	ROCA	25
10-02-97	CALE	S90E	5.1	61.25	19.50	133.62	20.35	14.73	ROCA	25
10-02-97	CALE	S00E	5.1	66.99	22.18	151.79	23.45	14.73	ROCA	25

Tabla 3.2.b *Información recopilada de los registros seleccionados de la Base Mexicana de Sismos Fuertes.*

De cada registro sísmico se obtuvo el espectro de pseudoaceleración tanto horizontal como vertical para poder obtener la relación V/H de cada uno. Con estos datos y además los mostrados

en la Tabla 3.2.a se realizaron las siguientes figuras con la finalidad de caracterizar al conjunto de registros y observar la influencia de las distintas variables.

- **Periodo de vibrar**

Las Figuras 3.2.b y 3.2.c muestran la relación entre las componentes vertical y horizontal para dos periodos de vibración (T= 0.2 y T = 1.5 segundos)

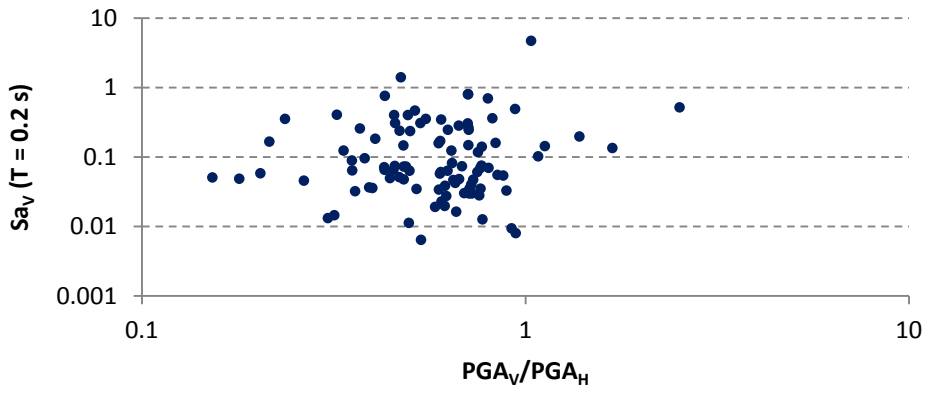


Figura 3.2.b *Sa_V (T = 0.2 s) vs relación PGA_V/PGA_H de cada registro sísmico.*

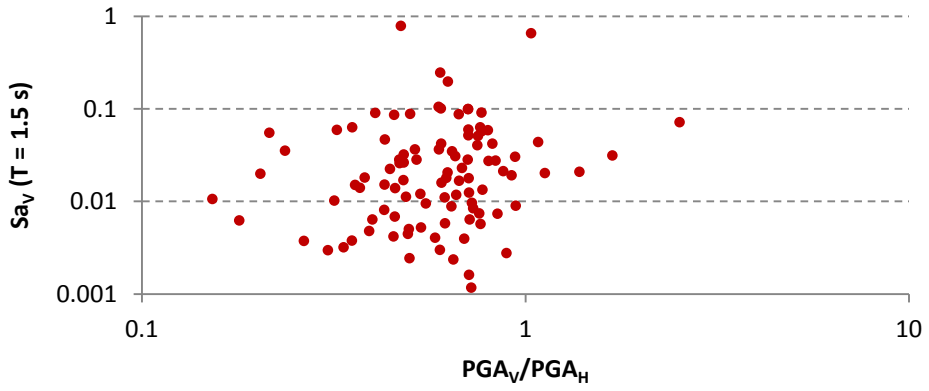


Figura 3.2.c *Sa_V (T = 1.5 s) vs relación PGA_V/PGA_H de cada registro sísmico.*

En las últimas dos figuras, se observa que disminuye la pseudoaceleración vertical al aumentar el periodo.

- **Profundidad del foco y magnitud**

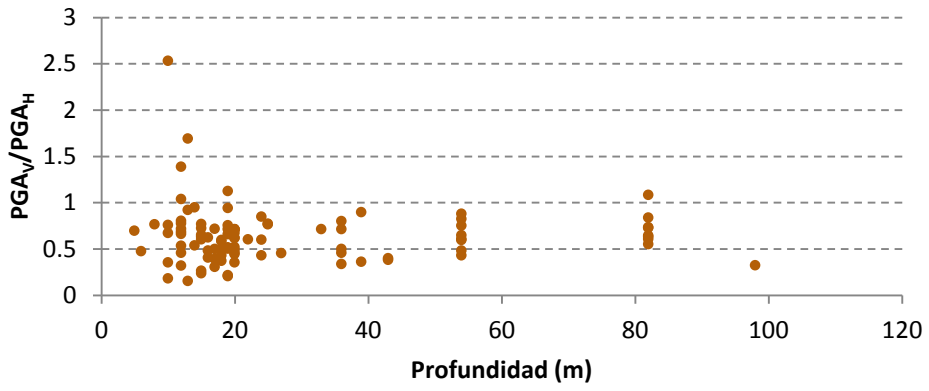


Figura 3.2.d *Relación PGA_V/PGA_H vs profundidad de cada registro sísmico.*

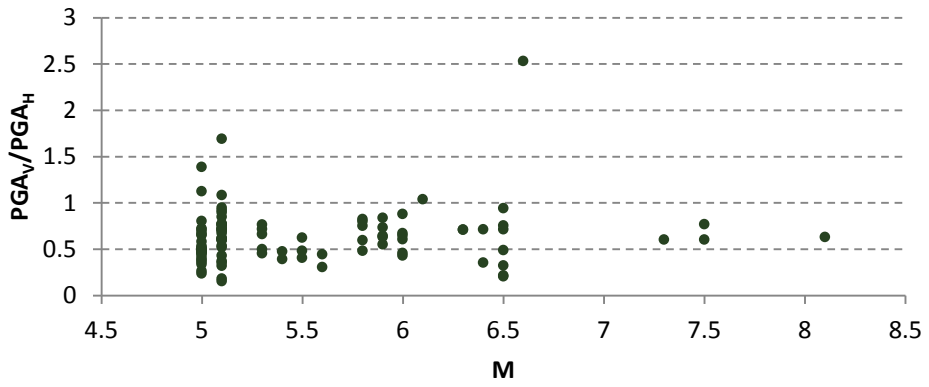


Figura 3.2.e *Relación PGA_V/PGA_H vs magnitud de cada registro sísmico.*

Las Figuras 3.2.d y 3.2.e muestran la variación de la relación aceleración máxima del terreno vertical / aceleración máxima del terreno horizontal (PGA_V/PGA_H) con respecto a la profundidad del epicentro y la magnitud respectivamente. Se observa que la componente vertical adquiere mayor relevancia para profundidades focales menores de 40 km, lo cual corresponde a los sismos superficiales que se generan en la región cercana a la costa del Pacífico Mexicano. Por lo que corresponde a la magnitud, se encuentra que la relación PGA_V/PGA_H es más alta para sismos de baja magnitud.

- **Distancia epicentral**

En la siguiente figura se muestra como disminuye la relación PGA_V/PGA_H con respecto a la distancia epicentral (R). La línea discontinua muestra la tendencia que siguen los datos, pero resalta el hecho de que existen algunos casos en los que la componente vertical es importante aún para distancias mayores a 50 km. Los dos casos más importantes son los señalados en la siguiente figura (señalados mediante flechas). El primero corresponde al registro obtenido de la estación Xaltianguis, ubicada en el estado de Guerrero, el 02 de mayo de 1989; el segundo registro se obtuvo de la estación El Balcón , también ubicada en Guerrero, el 08 de Febrero de 1988. Valores altos en la relación V/H son posibles para magnitudes relativamente bajas como lo son las de estos dos casos (con magnitudes de 5 y 5.1), sin embargo para conocer con precisión la razón por la cual dan tan altos los valores es necesario un estudio a fondo de estos dos casos.

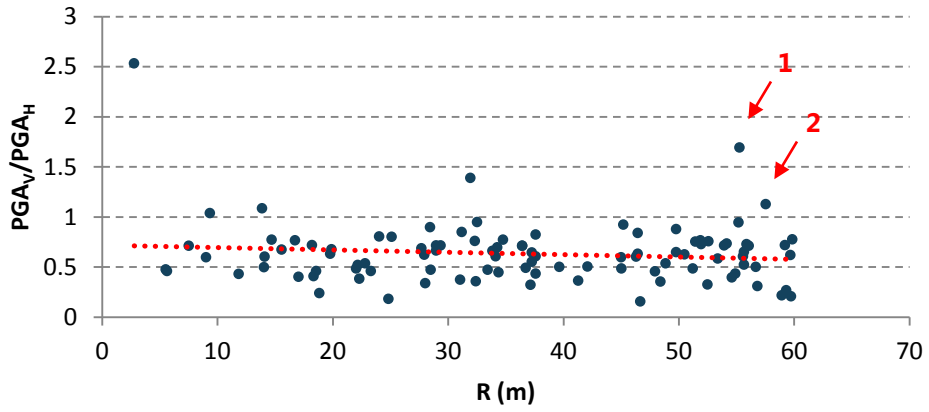


Figura 3.2.f *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de cada registro sísmico.*

- **Magnitud y distancia**

De ésta última gráfica se realizaron otras 4 dividiendo los registros de acuerdo a su magnitud. En las siguiente dos figuras se dividieron los registros en los que tenían magnitud de 5 a 5.4 (Figura 3.2.g) y de 5.5 en adelante (Figura 3.2.h).

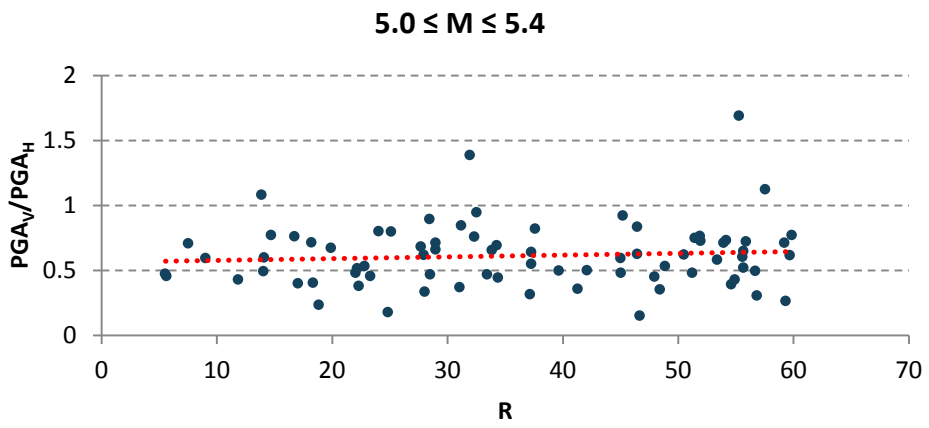


Figura 3.2.g *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con 5.0≤M≤5.4.*

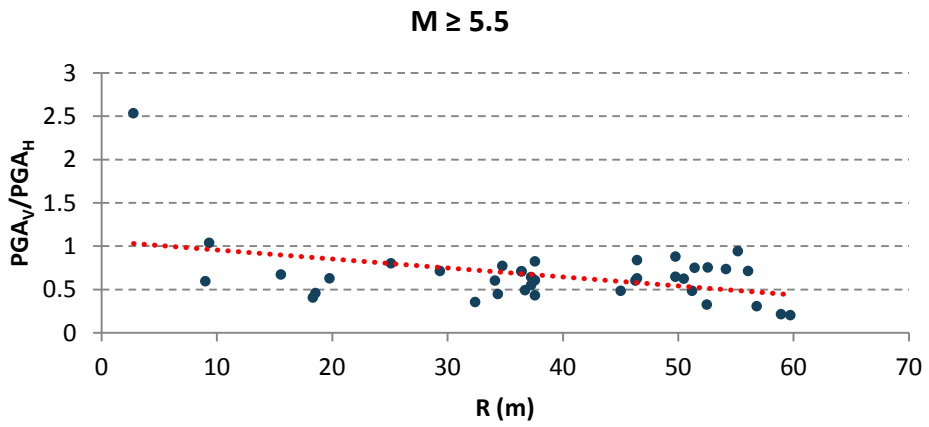


Figura 3.2.h *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con M≥5.5.*

En la siguientes dos graficas se dividieron los registros en magnitudes de 5 a 5.9 (Figura 3.2.i) y de 6 en adelante (Figura 3.2.j).

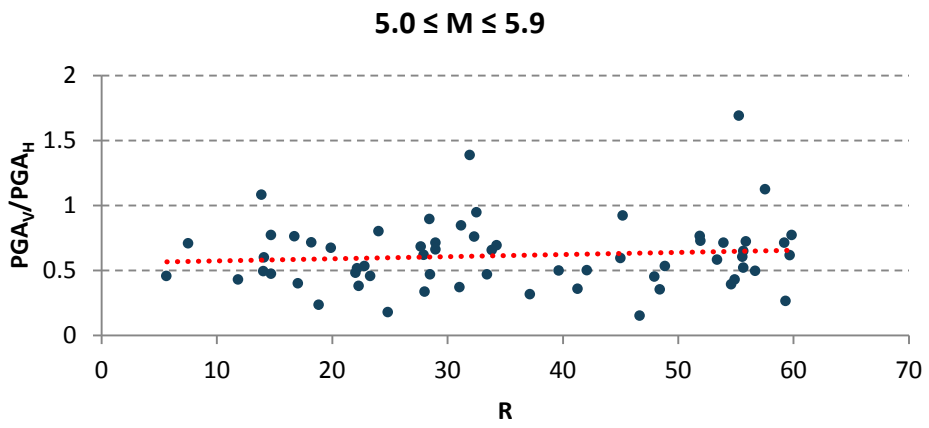


Figura 3.2.i *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con 5.0≤M≤5.9.*

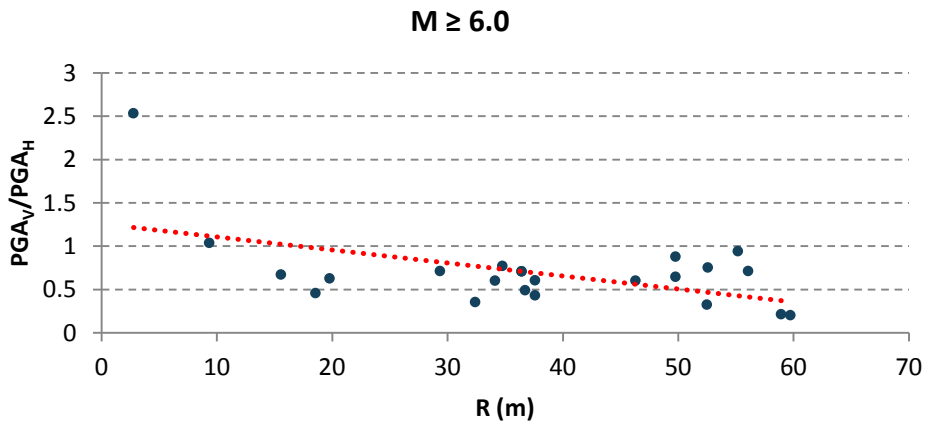


Figura 3.2.j *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con M≥6.0.*

Se observa de las 5 gráficas anteriores que mientras mayor es la distancia epicentral menor es la relación PGA_V/PGA_H, indicando que el efecto de la componente vertical es menor. Además, se tiene una línea de tendencia con pendiente mayor en los registros de mayor magnitud, esto significa que la magnitud es directamente proporcional con la diferencia entre la relación PGA_V/PGA_H de una distancia epicentral corta y una larga.

- **Tipo de terreno**

En la siguiente gráfica se dividió el conjunto de registros seleccionados (100 registros en total) de acuerdo al tipo de terreno, esto es, terreno rocoso y terreno blando. Como es de esperarse, para terreno blando la amplificación del movimiento (relación Sa/PGA) es mayor, tanto para la componente vertical como para la horizontal (líneas sólidas). Se observa que la amplificación del movimiento vertical (líneas rojas) se presenta en periodos cortos, alrededor de 0.2 segundos, mientras que la amplificación del movimiento horizontal en terreno blando se produce en periodos cercanos a medio segundo.

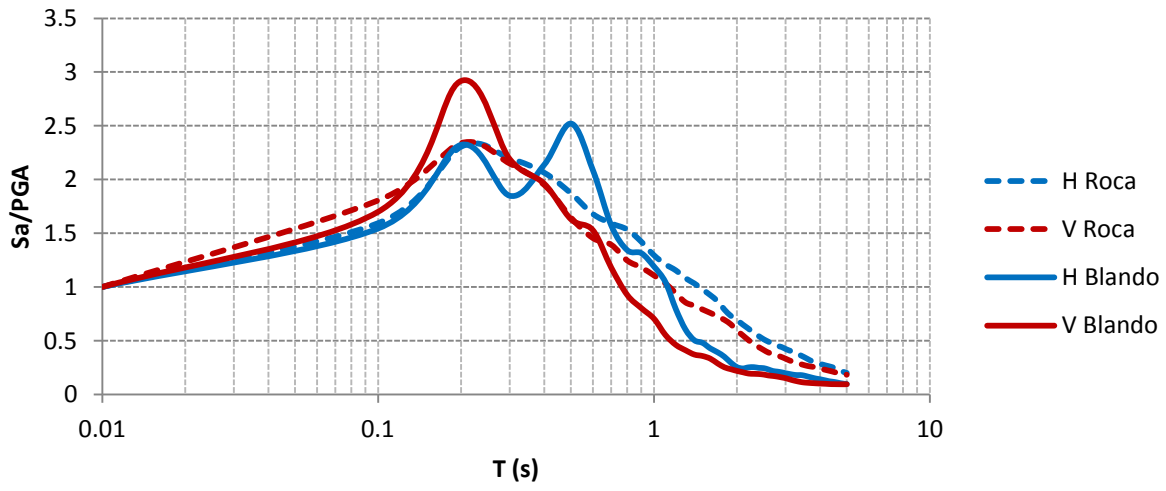


Figura 3.2.k *Relación Sa/PGA vs Periodo.*

- **Conclusiones**

De forma resumida se puede decir que el valor de la relación V/H de 2/3 es incorrecto para cierto tipo de sismos ya que depende de la magnitud del sismo así como de la distancia epicentral y su profundidad. El tipo de terreno también juega un papel importante ya que la componente vertical llega más rápido que las otras dos componentes en terreno blando y además con mayor intensidad debido a que sufre una amplificación en este tipo de terreno.

En el conjunto de registros sísmicos seleccionados, el valor máximo obtenido para la relación de V/H es de 2.53, mas de 3 veces el valor recomendado de 2/3. El registro anterior corresponde al

registro de la estación Islas Agrarias (clave IAGS) del 15 de octubre de 1979 en terreno blando. En cuanto a terreno rocoso, el valor máximo de la relación V/H es de 1.69, mas de 2 veces el valor propuesto por Newmark et al. de 2/3; éste registro corresponde al de la estación Xaltianguis del 02 de mayo de 1989.

Con respecto a los códigos internacionales destaca que solo dos de ellos, el Eurocódigo (CEN, 2008) y el Manual de Obras Civiles (MDOC, 2008), consideran el periodo de la estructura para determinar el valor de la fuerza de inercia que produce la componente vertical del sismo a pesar de que se han hecho estudios (Rosenblueth, 1975) que indican la relación que existe entre ellos. Además países con alta sismicidad, como Chile y Nueva Zelanda, no consideran la componente vertical en lo absoluto.

Se verifico que la relación V/H es generalmente directamente proporcional con la magnitud del sismo e inversamente proporcional con la profundidad y con la distancia epicentral.

Capítulo 4 Análisis lineal de los puentes en distintas etapas de construcción

En este capitulo se realizan análisis lineales en la historia del tiempo de los diferentes tipos de puentes considerados en el estudio y para las etapas constructivas representativas de cada caso. La finalidad de estos análisis es determinar cuales etapas y que partes del puente en construcción son las más vulnerables a la componente vertical del movimiento. A continuación se presenta una descripción de cada uno de los puentes analizados; además, se presenta el sismo que fue utilizado en los análisis así como los resultados obtenidos en cada etapa para los diferentes tipos de puentes.

4.1. Puente recto tipo viga

El primer puente estudiado es un puente recto tipo viga analizado mediante el método de construcción conocido como lanzamiento por incrementos sucesivos (Puente A). El puente tiene una pendiente longitudinal de 1%, longitud total de 203 m y altura mayor de pila de 45 m. Las dimensiones restantes se muestran en la siguiente figura. Puente recto tipo viga

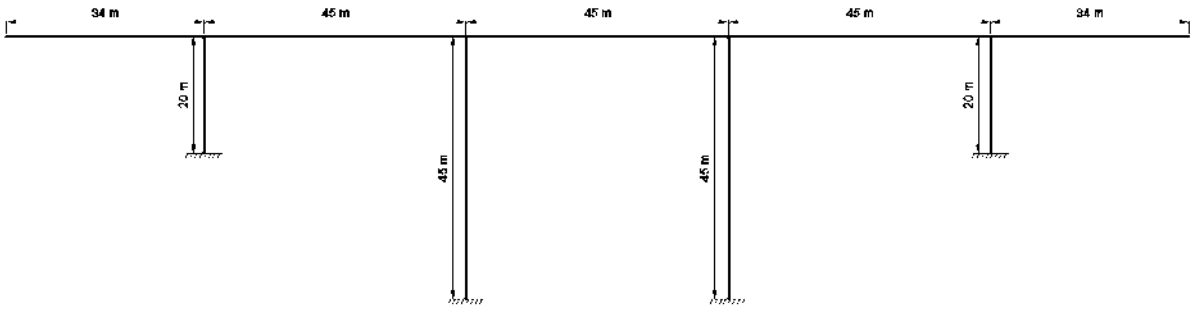


Figura 4.1.a *Dimensiones de puente recto tipo viga.*

La longitud de los claros se encuentra dentro del intervalo económico de entre 30 y 60 m (Mexpresa) Las pilas son de sección circular hueca, constante a lo largo de toda la altura de la columna. La pila de mayor altura tienen un diámetro exterior de 5 m con espesor de 0.75 m y las de menor altura cuentan con un diámetro exterior de 3 m con espesor de 0.5 m.

Con respecto a la sección transversal, también se utilizaron las recomendaciones de Mexpresa para definir la altura de la sección.

El articulo recomienda que una relación $L/H = 15\ a\ 17$, donde *L* corresponde a la longitud del claro mayor del puente y *H* a la altura de la sección transversal.

Para el espesor de la losa superior de la sección transversal (t_t), donde solamente rigen fuerzas transversales y de penetración (en áreas donde no se ve afectado por cables de pretensado), se recomienda el siguiente espesor (Rosignoli, 2002):

$$t_t = \frac{As}{25\ a\ 30}$$

Donde *As* es el ancho superior sin incluir la longitud de las alas de la sección (en metros).

Los valores mínimos deben estar entre 0.22 m y 0.26 m dependiendo de la distancia entre cada alma y la presencia o no de un pretensado transversal (Rosignoli, 2002).

El espesor del alma de una sección ubicada al centro de un claro está regido por los esfuerzos de cortante de lanzamiento. Al pasar por encima de una pila, resiste esfuerzos tangenciales debidos a la carga muerta. La sección transversal del puente debe ser capaz de resistir esfuerzos que serán mayores durante su construcción que en su estado final, característica particular de este método constructivo. Por lo tanto, las almas de la sección son diseñadas para resistir este cambio de esfuerzos y se recomienda utilizar el siguiente espesor (en metros) (Rosignoli, 2002):

$$t_w = Ai\left(\frac{L}{2100} + 0.02\right)$$

Con un valor mínimo de 0.3 m.

Donde *Ai* es el ancho inferior de la sección transversal y *L* es la longitud del claro mayor.

Por último, se recomienda utilizar la siguiente expresión para calcular el espesor de la losa inferior de la sección transversal (Rosignoli, 2002):

$$t_b = (As - t_w)\left(0.07 - \frac{L}{3700}\right)$$

Con un valor mínimo de 0.18 m.

Con base en las recomendaciones anteriores se definieron los siguientes espesores utilizados para el puente en estudio:

$$t_t = 0.30\ m$$

$$t_w = 0.40\ m$$

$$t_b = 0.35\ m$$

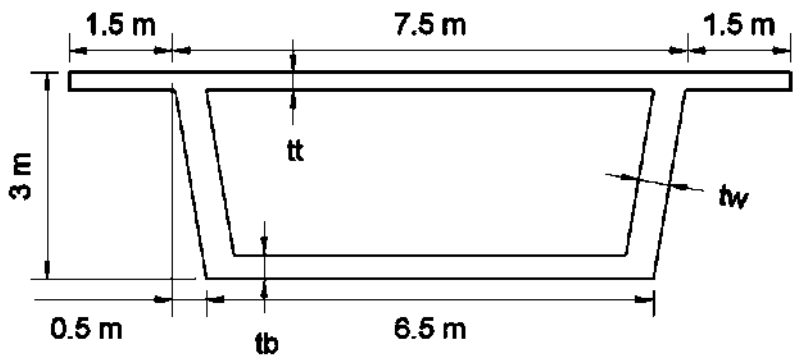


Figura 4.1.b *Dimensiones de sección transversal.*

La Figura 4.1b muestra la geometría de la sección transversal que se utiliza en los análisis posteriores y que se obtuvo siguiendo las recomendaciones descritas.

La longitud de la nariz de lanzamiento se planteó de 60% de la longitud del claro mayor, longitud considerada como la más económica para puentes carreteros (Mexpresa). La longitud total resultó de 27m, con arriostramientos a cada 4.5 m y con un ancho de 6.5 m como se muestra en las siguientes figuras:

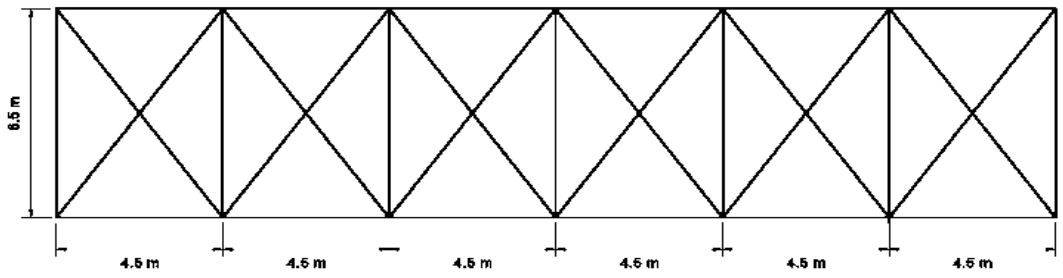


Figura 4.1.c *Dimensiones de la nariz de lanzamiento en planta.*

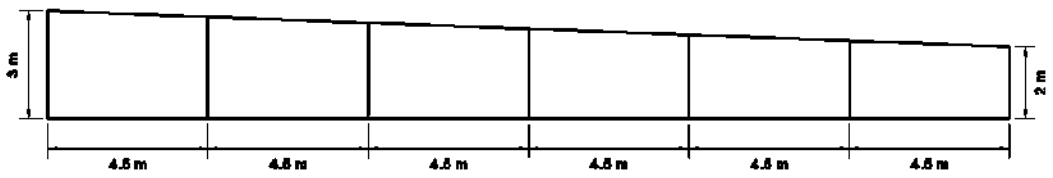


Figura 4.1.d *Dimensiones de la nariz de lanzamiento en corte longitudinal.*

Mientras que en la parte inferior de las pilas se consideran empotradas, en la parte superior de ellas se considera cierta flexibilidad debida al apoyo de neopreno utilizado. Se considero un apoyo de neopreno de 40 x 40 cm con 5.7 cm de altura. La rigidez vertical y horizontal del apoyo se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$K_h = \frac{GA}{h_r}; \quad K_h = \frac{1(40 \times 40)}{4.3} = 372.09\ Mpa \cdot cm$$

donde:

$G = módulo\ de\ elasticidad\ transversal\ de\ la\ goma\ o\ elastómero$

$A = área\ superficial\ del\ apoyo\ de\ neopreno$

$h_r = altura\ total\ de\ las\ capas\ de\ neopreno$

Debido a que la rigidez axial de un apoyo de neopreno es mucho mayor que la rigidez lateral, se propone que sea 100 veces más grande como se señala en la siguiente ecuación:

$$K_v = 100\ K_h = 100\ (372.09) = 37209.3\ Mpa \cdot cm$$

Se realizó un análisis modal del puente mediante el programa Sap2000 (versión 14, 2009) en cuatro etapas diferentes de construcción.

A continuación se muestra el primer modo vertical y el primer modo transversal de cada una de las etapas constructivas, así como los dos modos cuyos periodos sean los más cercanos al periodo donde se presenta la aceleración máxima del registro utilizado en el análisis. (a_{max} se presenta para T= 0.20 s para el registro de la estación Victoria, sismo del año 1996 y magnitud de 6.1).

En cada una de las figuras siguientes se presenta la configuración de la forma modal, el número de modo, la dirección preponderante de la forma modal (T – Transversal, V – Vertical, Tor. – Torsión, A – Axial y $A_{X\text{-}X}$ – Acoplamiento de las dos formas modales (X-X) mas importantes de ese modo, así como su periodo.

La primera etapa corresponde al momento en que la nariz de lanzamiento está próxima a la siguiente pila, pero sin apoyarse en ella.

- Etapa 1 (Puente A - E1)

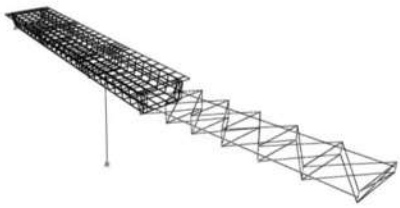


Figura 4.1.e *Modo 1: V – 1.72 s.*

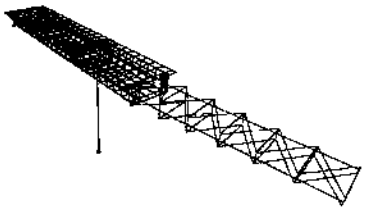


Figura 4.1.f *Modo 2: T – 1.63 s.*

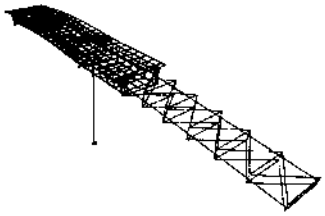


Figura 4.1.g *Modo 8: $A_{V\text{-}A}$ – 0.21 s.*

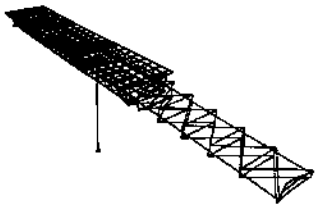


Figura 4.1.h *Modo 9: $A_{A\text{-}V}$ – 0.16 s.*

La segunda etapa corresponde al caso en que el tablero está apoyado en la pila 1 y en la pila 2 y en la cual la nariz de lanzamiento está próxima a la pila 3, pero sin apoyarse en ella.

- Etapa 2 (Puente A - E2)

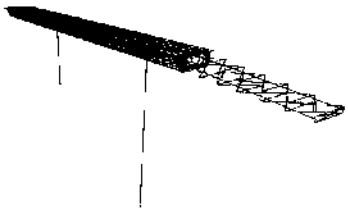


Figura 4.1.i *Modo 1: T – 1.89 s.*

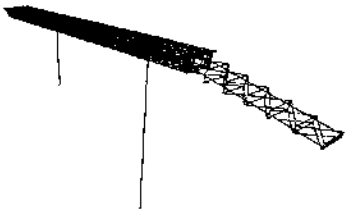


Figura 4.1.j *Modo 2: V – 1.73 s.*

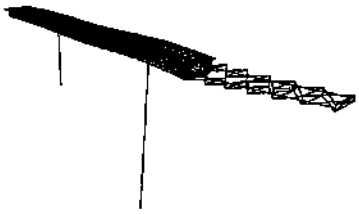


Figura 4.1.k *Modo 11: V – 0.24 s.*

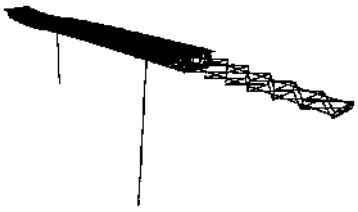


Figura 4.1.l *Modo 12: A_{V-A} – 0.22 s.*

En la tercera etapa se tiene el tablero apoyado en las pilas 1, 2 y 3 y la nariz de lanzamiento casi llega a la pila 4 pero sin tocarla.

- Etapa 3 (Puente A - E3)

Figura 4.1.m *Modo 1: T – 2.10 s.*

Figura 4.1.n *Modo 2: V – 1.73 s.*

Figura 4.1.o *Modo 11: V – 0.37 s.*

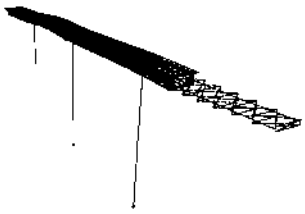


Figura 4.1.p *Modo 12: V – 0.28 s.*

La siguiente etapa corresponde al puente terminado.

- Puente Terminado (Puente A - T)

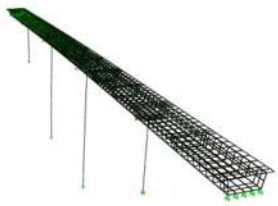


Figura 4.1.q *Modo 1: T – 1.45 s.*

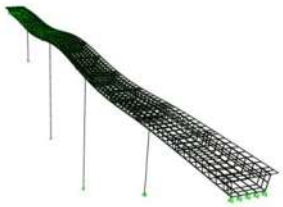


Figura 4.1.r *Modo 11: V – 0.3 s.*

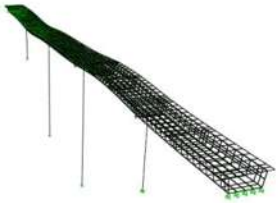
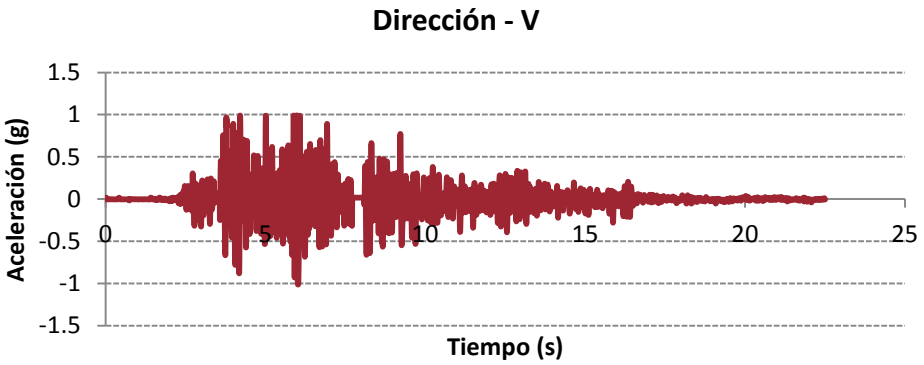
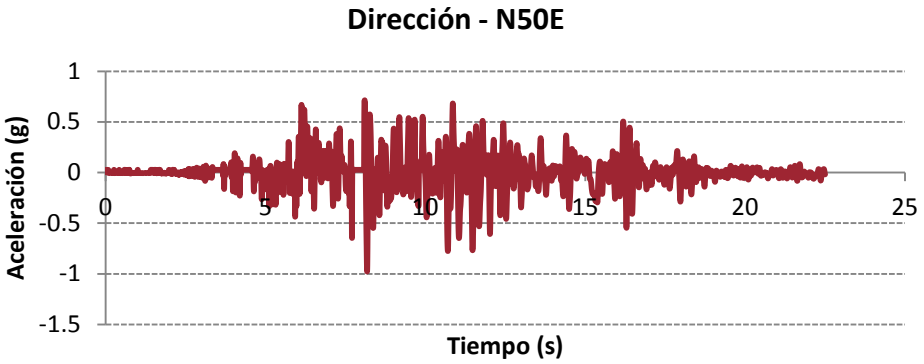
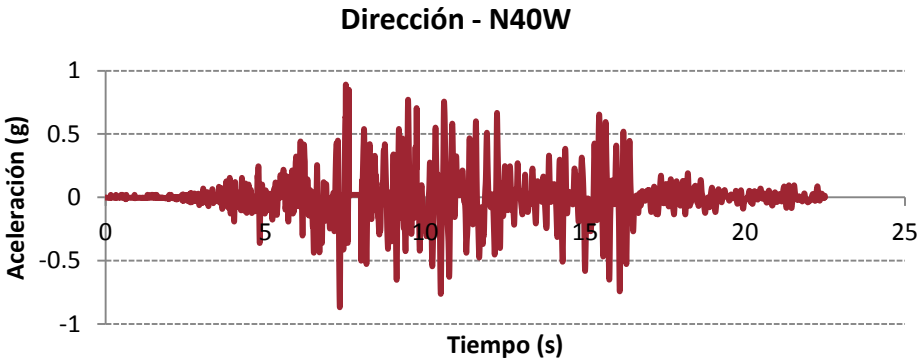


Figura 4.1.s *Modo 12: V – 0.31 s.*

Cada una de los modelos correspondientes a las cuatro etapas constructivas del puente se sometió a un análisis de historia en el tiempo con el registro sísmico de la estación Victoria ocurrido el 1 de mayo de 1996. En las siguientes figuras se presentan los acelerogramas de las tres componentes del registro utilizado.







Se realizaron dos análisis, en el primero se sometió al puente a únicamente las dos componentes horizontales del registro, y en el segundo se incluye también la componente vertical. La influencia de la componente vertical en las zonas estudiadas del puente se presenta como el valor numérico que resulta de las siguientes relaciones.

Se decidió considerar los cinco diferentes índices descritos a continuación:

$$1 \ldots \frac{3C}{2C}$$

$$2 \ldots \frac{3C}{M}$$

$$3 \ldots \frac{2C}{M}$$

$$4 \ldots \frac{3C - 2C}{M}$$

$$5 \ldots \frac{M + 3C}{M} \Big/ \frac{M + 2C}{M}$$

donde:

$\boldsymbol{M} = valor\ numérico\ resultante\ al\ realizar\ el\ análisis\ utilizando\ solamente\ carga\ muerta$

$\boldsymbol{2C} = valor\ numérico\ resultante\ al\ realizar\ el\ análisis\ de\ historia\ en\ el\ tiempo\ utilizando\ las\ dos\ componentes\ horizontales\ del\ sismo$

$\boldsymbol{3C} = valor\ numérico\ resultante\ al\ realizar\ el\ análisis\ de\ historia\ en\ el\ tiempo\ utilizando\ las\ tres\ componentes\ horizontales\ del\ sismo$

El resultado de cada índice se muestra después del esquema de cada una de las etapas constructivas consideradas. Los elementos placa en los que se obtuvieron los elementos mecánicos del tablero se ubican en su centro transversal, tanto de la losa superior como inferior. En dirección longitudinal, los elementos placa considerados se ubican al centro del claro e inmediatamente antes de llegar a la pila. Los nodos analizados se ubican en la parte inferior de las pilas.

Los valores que se encuentran en rojo en las siguientes tablas de resultados corresponden a los valores resultantes que indican un aumento igual o mayor al 10%. El valor en color rojo y en negrita es el valor máximo de cada sección.

- Etapa 1 (Puente A - E1)

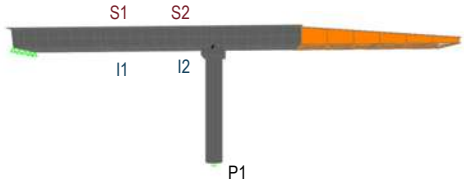


Figura 4.1.t *Partes analizadas del Puente A, etapa 1.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	1.0272	**1.3907**	0.5340	1.1294	0.5198	0.8121	0.0141	0.1294	1.0093	**1.1751**
S2	**1.4281**	1.0340	0.3203	**1.6964**	0.2243	**1.6405**	0.0960	0.6964	1.0784	1.0212
I1	1.0507	0.9376	0.6964	0.1084	0.6628	0.1156	0.0336	-0.8916	1.0202	0.9935
I2	**1.5865**	**1.3913**	0.1024	0.3964	0.0646	0.2849	0.0379	-0.6036	1.0356	1.0868

Tabla 4.1.a *Resultados de elementos en tablero del Puente A, etapa 1.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0005	**294.2024**	**294.0648**	0.1376	1.0005
Axial	**3.0989**	-0.2782	-0.0898	-0.1884	**1.1269**
M_R	1.0007	222.4170	222.2723	0.1447	1.0006

Tabla 4.1.b *Resultados de la pila 1 del Puente A, etapa 1.*

- Etapa 2 (Puente A – E2)

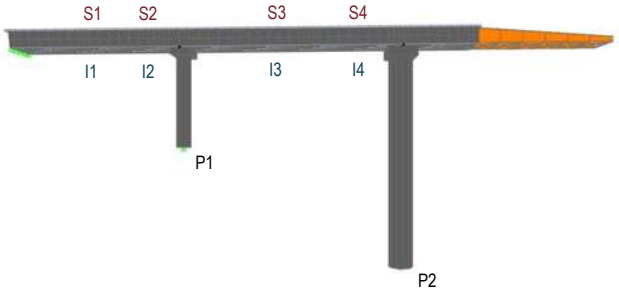


Figura 4.1.u *Partes analizadas del Puente A, etapa 2.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	1.0813	**1.3757**	0.7731	**4.8975**	0.7150	**3.5600**	0.0581	**3.8975**	1.0339	**1.2933**
S2	1.1954	1.0264	0.3817	3.4486	0.3194	3.3600	0.0624	2.4486	1.0473	1.0203
S3	2.3740	1.1689	0.3467	3.2646	0.1460	2.7929	0.2007	2.2646	1.1751	1.1244

S4	**3.4572**	0.9387	0.4128	2.3122	0.1194	2.4633	0.2934	1.3122	**1.2621**	0.9564
I1	1.0873	0.9956	0.8420	0.4011	0.7744	0.4029	0.0676	-0.5989	1.0381	0.9987
I2	0.8603	0.8661	0.3685	0.3297	0.4283	0.3807	-0.0598	-0.6703	0.9581	0.9631
I3	**1.7842**	1.0563	0.3158	0.3201	0.1770	0.3031	0.1388	-0.6799	**1.1179**	1.0131
I4	0.9941	1.0167	0.2821	0.2835	0.2837	0.2789	-0.0017	-0.7165	0.9987	1.0036

Tabla 4.1.c *Resultados de elementos en tablero del Puente A, etapa 2.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0004	**198.7356**	**198.6590**	0.0765	1.0004
Axial	**1.5783**	-0.3186	-0.2018	-0.1167	1.0625
M_R	1.0009	156.0677	155.9283	0.1393	1.0009

Tabla 4.1.d *Resultados de la pila 1 del Puente A, etapa 2.*

P2	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	0.9998	**1288.9071**	**1289.2014**	-0.2943	0.9998
Axial	**32.4679**	-0.2944	-0.0091	-0.2854	**1.3791**
M_R	1.0002	844.5321	844.3240	0.2081	1.0002

Tabla 4.1.e *Resultados de la pila 2 del Puente A, etapa 2.*

- Etapa 3 (Puente A – E3)

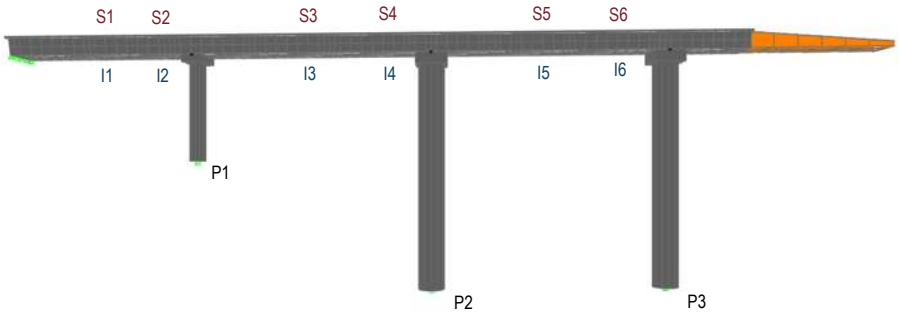


Figura 4.1.v *Partes analizadas del Puente A, etapa 3.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	0.9163	0.9348	**0.9330**	2.7338	1.0183	2.9244	-0.0853	1.7338	0.9577	0.9514
S2	0.8539	1.0266	0.4433	3.8656	0.5191	3.7656	-0.0758	2.8656	0.9501	1.0210
S3	1.9090	1.0048	0.3709	**8.7895**	0.1943	8.7479	0.1766	7.7895	1.1479	1.0043
S4	2.4274	0.9895	0.3732	8.7464	0.1537	**8.8393**	0.2194	7.7464	1.1902	0.9906
S5	2.5365	0.9986	0.4178	7.1270	0.1647	7.1370	0.2531	**6.1270**	1.2173	0.9988
S6	**4.0967**	1.0489	0.4307	2.1468	0.1051	2.0468	0.3256	1.1468	**1.2946**	1.0328
I1	0.9358	1.0093	0.9180	0.4294	0.9809	0.4254	-0.0629	-0.5706	0.9682	1.0028
I2	0.8410	0.8437	0.6006	0.5315	0.7141	0.6300	-0.1136	-0.4685	0.9337	0.9396
I3	1.3796	1.0077	0.3341	0.4444	0.2422	0.4410	0.0919	-0.5556	1.0740	1.0024
I4	1.6104	**1.6216**	0.3344	0.3143	0.2076	0.1938	0.1267	-0.6857	1.1049	**1.1009**
I5	**1.5857**	1.0071	0.3603	0.4419	0.2272	0.4388	0.1331	-0.5581	1.1084	1.0022
I6	1.4318	1.2072	0.3924	0.3843	0.2741	0.3183	0.1184	-0.6157	1.0929	1.0500

Tabla 4.1.f *Resultados de elementos en tablero del Puente A, etapa 3.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0006	**211.6247**	**211.5059**	0.1188	1.0006
Axial	**1.5259**	-0.3157	-0.2069	-0.1088	0.9644
M_R	1.0009	159.6741	159.5304	0.1436	1.0009

Tabla 4.1.g *Resultados de la pila 1 del Puente A, etapa 3.*

P2	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0000	**496.3531**	**496.3680**	-0.0149	1.0000
Axial	**11.3352**	-0.2658	-0.0234	-0.2423	**1.3612**
M_R	1.0001	327.5587	327.5283	0.0304	1.0001

Tabla 4.1.h *Resultados de la Pila 2 del Puente A, Etapa 3.*

P3	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	0.9999	**2285.3853**	**2285.5687**	-0.1834	0.9999
Axial	**17.4924**	-0.3041	-0.0174	-0.2867	**1.3498**
M_R	1.0003	1709.8901	1709.4446	0.4455	1.0003

Tabla 4.1.i *Resultados de la pila 3 del Puente A, etapa 3.*

- Puente Terminado (Puente A - T)

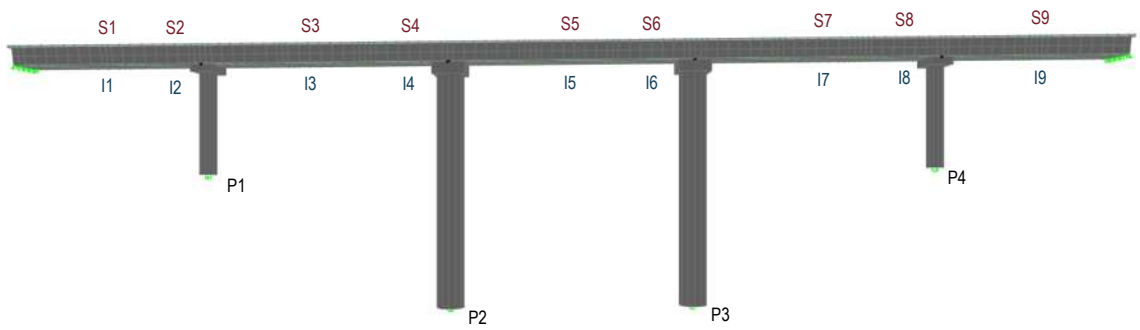


Figura 4.1.w *Partes analizadas del Puente A terminado.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	0.9538	0.9815	**1.2944**	10.1559	**1.3570**	10.3471	-0.0627	9.1559	0.9734	0.9832
S2	1.0263	0.9278	0.5800	11.5930	0.5651	12.4953	0.0148	10.5930	1.0095	0.9331
S3	2.7010	**1.4387**	0.4105	9.9636	0.1520	6.9256	0.2585	8.9636	1.2244	**1.3833**
S4	1.2585	0.9968	0.3597	11.1786	0.2859	11.2143	0.0739	10.1786	1.0575	0.9971
S5	**7.6651**	0.9976	0.4721	8.1559	0.0616	8.1752	0.4105	7.1559	**1.3867**	0.9979
S6	1.2372	1.0006	0.4604	**39.6279**	0.3721	**39.6047**	0.0883	**38.6279**	1.0643	1.0006
S7	2.6185	1.1952	0.4147	12.8356	0.1584	10.7396	0.2563	11.8356	1.2213	1.1785
S8	0.9680	0.9656	0.4812	3.3468	0.4971	3.4661	-0.0159	2.3468	0.9894	0.9733
S9	0.9164	0.9959	0.8777	4.6462	0.9577	4.6654	-0.0800	3.6462	0.9591	0.9966
I1	1.0367	1.0305	**1.7310**	1.0981	**1.6696**	1.0656	0.0613	0.0981	1.0230	1.0157
I2	0.9874	1.1127	1.6397	0.5671	1.6606	0.5097	-0.0209	-0.4329	0.9921	1.0381
I3	1.0560	0.9976	0.2324	0.1200	0.2200	0.1203	0.0123	-0.8800	1.0101	0.9997

I4	1.0179	0.8920	1.3140	0.2068	1.2909	0.2319	0.0231	-0.7932	1.0101	0.9797
I5	**1.5666**	0.9825	0.3884	0.0361	0.2479	0.0367	0.1405	-0.9639	**1.1126**	0.9994
I6	1.0154	1.1681	1.4106	0.5519	1.3893	0.4724	0.0213	-0.4481	1.0089	1.0539
I7	1.1247	0.9724	0.3638	0.1813	0.3235	0.1865	0.0403	-0.8187	1.0305	0.9957
I8	0.9823	**1.3289**	1.3417	0.5638	1.3658	0.4243	-0.0242	-0.4362	0.9898	1.0980
I9	0.9052	1.0665	0.9963	0.9439	1.1007	0.8851	-0.1044	-0.0561	0.9503	1.0312

Tabla 4.1.j *Resultados de elementos en tablero del Puente A terminado.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	0.9994	**201.2325**	**201.3610**	-0.1285	0.9994
Axial	**1.3559**	-0.3230	-0.2382	-0.0848	1.0095
M_R	0.9994	161.7365	161.8350	-0.0985	0.9994

Tabla 4.1.k *Resultados de la pila 1 del Puente A terminado.*

P2	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	0.9999	**561.3906**	**561.4372**	-0.0467	0.9999
Axial	**6.8187**	-0.2934	-0.0430	-0.2504	**1.4051**
M_R	1.0002	338.4610	338.4100	0.0510	1.0002

Tabla 4.1.l *Resultados de la pila 2 del Puente A terminado.*

P3	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0002	396.7031	396.6120	0.0911	1.0002
Axial	**10.2725**	-0.3087	-0.0300	-0.2786	**1.3801**
M_R	1.0002	**456.1040**	**456.0266**	0.0774	1.0002

Tabla 4.1.m *Resultados de la pila 3 del Puente A terminado.*

P4	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	0.9996	**238.9186**	**239.0179**	-0.0993	0.9996
Axial	**1.0706**	-0.3208	-0.2997	-0.0212	1.0397
M_R	0.9995	191.7713	191.8602	-0.0888	0.9995

Tabla 4.1.n *Resultados de la pila 4 del Puente A terminado.*

En las tablas anteriores se puede observar que las primeras 3 relaciones pueden arrojar como resultado un gran aumento al utilizar la componente vertical. Esta situación se produce en aquellos casos en los que una de las magnitudes es muy baja, por ejemplo, si el momento flexionante por carga muerta en una sección es muy pequeño, un incremento debido a la componente vertical, aunque no sea importante, puede llevar a un índice 3C/M muy elevado por lo reducido del denominador. El valor de dicha relación no refleja adecuadamente la importancia del efecto vertical. Por tal motivo, se decidió emplear como índice del efecto de la componente vertical del sismo a la penúltima relación ya que se reduce el valor del numerador al restar el efecto de las dos componentes (3C-2C) y a la última relación pues queda normalizada con respecto al valor de la carga muerta.

A continuación se muestra el valor máximo obtenido de las ultimas dos relaciones así como la etapa en la que se encuentra ese valor.

	(3C-2C)/M				[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA
S	0.4105	T	**38.6279**	T	**1.3867**	T	**1.3833**	T
I	0.1405	T	0.0981	T	**1.1179**	2	**1.1009**	3

Tabla 4.1.o *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente A.*

P1	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
V_R	0.1376	1	1.0006	3
Axial	-0.0848	T	**1.1269**	1
M_R	0.1447	1	1.0009	2

P2	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
V_R	-0.0149	3	1.0000	3
Axial	-0.2423	3	**1.4051**	T
M_R	0.2081	2	1.0002	2

P3	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
V_R	0.0911	T	1.0002	T
Axial	-0.2786	3	**1.3801**	T
M_R	0.4455	3	1.0003	3

P4	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
V_R	-0.0993	T	0.9996	T
Axial	-0.0212	T	1.0397	T
M_R	-0.0888	T	0.9995	T

Tabla 4.1.p *Resultados máximos de las pilas del Puente A.*

Analizando el conjunto total de resultados se puede observar que en el Puente A las etapas que se ven mas afectadas por la componente vertical son la 2, 3 y el puente terminado.

4.2. Puente curvo

El puente curvo que se eligió para el estudio es semejante al puente San Cristóbal que se derrumbó durante su construcción, como se describe en el capítulo 2. El puente tiene una longitud total de 324 m y la superestructura está construida mediante una sección compuesta. La sección transversal es un cajón metálico conformado por 26 dovelas de 12 m de longitud y 2 dovelas de 9 m ubicadas en los extremos. El claro principal es de 180.6 m y los 2 restantes son de 71.7 m. Las 2 pilas son de sección rectangular hueca que miden 8 x 3 m, con un espesor de 1 m en las paredes de 8 m de longitud y de 0.8 m en las paredes de 3 m de longitud. El puente tiene una pendiente longitudinal de 5% y una transversal de 10%.

En las siguientes figuras se muestran las dimensiones en planta del puente así como de la sección transversal del tablero.

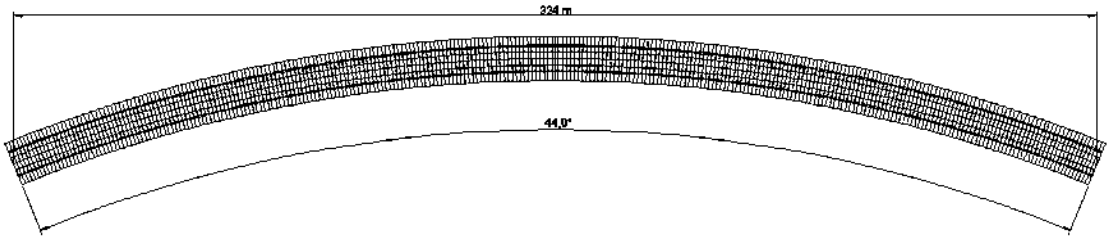


Figura 4.2.a *Puente curvo en planta.*

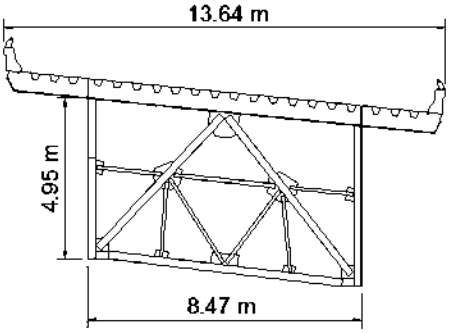


Figura 4.2.b *Sección transversal del tablero del puente curvo.*

El espesor de las placas laterales del puente es de 0.24 m, el de la parte inferior de 0.25 m y el de la parte superior de 0.30 m.

Se consideraron apoyos de neopreno cuyas rigideces se calcularon con la misma fórmula utilizada para el puente anterior.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$K_h = 379.5318\ Mpa \cdot cm$$
$$K_v = 379531.8\ Mpa \cdot cm$$

A continuación se presenta una descripción de cada una de las etapas de construcción del puente que fueron consideradas en los análisis, además de la figura de los cuatro modos más importantes (mismos del puente anterior) de cada etapa obtenidas con el programa Sap2000 (versión 14, 2009).

La primera etapa es en la cual se inicia a empujar el tablero del puente sin llegar a la primera pila. En esta etapa el puente esta en un voladizo de 72 m.

- Etapa 1 (Puente B - E1)

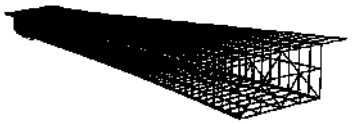


Figura 4.2.c *Modo 1: V – 1.29 s.*

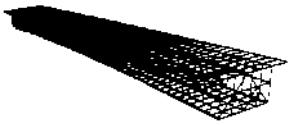


Figura 4.2.d *Modo 2: T – 0.74 s.*

Figura 4.2.e *Modo 3: Tor. – 0.25 s.*

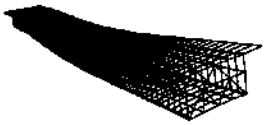


Figura 4.2.f *Modo 4: V – 0.20 s.*

En la segunda etapa el tablero del puente ya está apoyado sobre la primera pila y el extremo más alejado del tablero está a 21 m de la pila (en voladizo) sobre el claro principal.

- Etapa 2 (Puente B – E2)

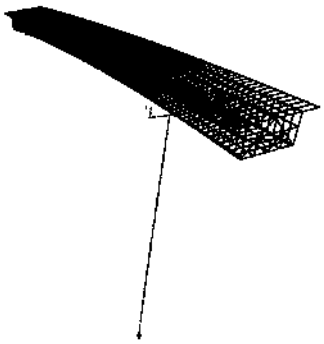


Figura 4.2.g *Modo 2: T – 1.19 s.*

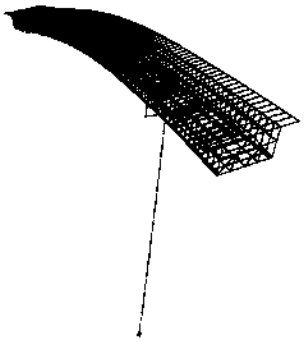


Figura 4.2.h *Modo 5: V – 0.35 s.*

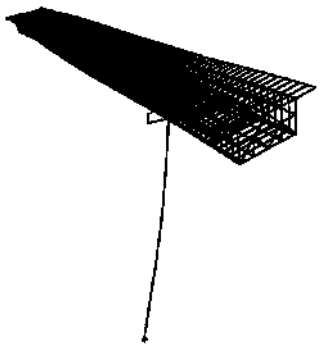


Figura 4.2.i *Modo 7: Tor. – 0.24 s.*

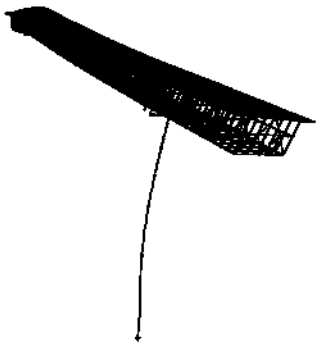


Figura 4.2.j *Modo 8: Tor. – 0.20 s.*

En la etapa 3, al seguir empujando el puente otros 23 m se tiene un voladizo de 44 m sobre el claro principal.

- Etapa 3 (Puente B – E3)

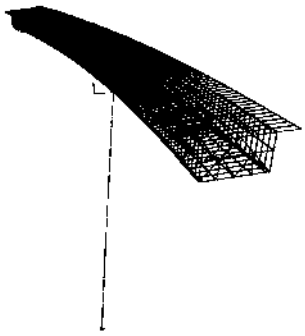


Figura 4.2.k *Modo 1: T – 1.75 s.*

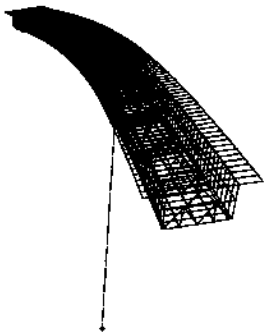


Figura 4.2.l *Modo 4: V – 0.70 s.*

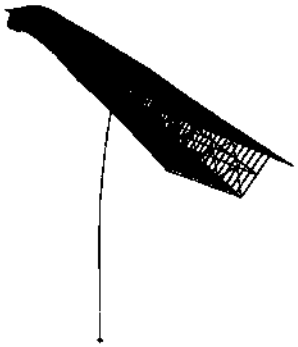


Figura 4.2.m *Modo 8: Tor. – 0.25 s.*

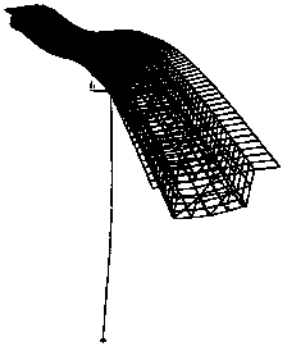


Figura 4.2.n *Modo 9: V – 0.16 s.*

En la etapa 4, la etapa antes de completar el puente, se tiene un voladizo de 90 m.

- Etapa 4 (Puente B – E4)

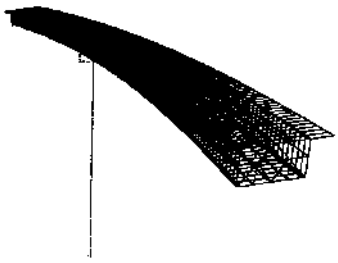


Figura 4.2.o *Modo 1: T – 3.60 s.*

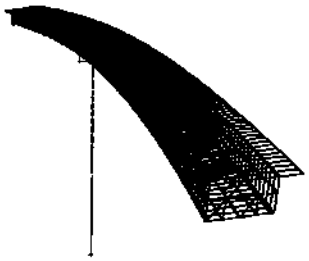


Figura 4.2.p *Modo 2: V – 2.09 s.*

Figura 4.2.q *Modo 10: T – 0.20 s.*

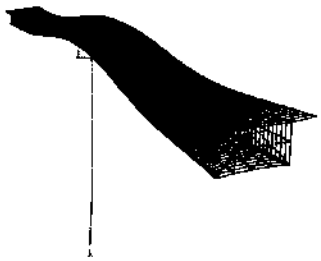


Figura 4.2.r *Modo 11: V – 0.16 s.*

- Puente Terminado (Puente B – T)

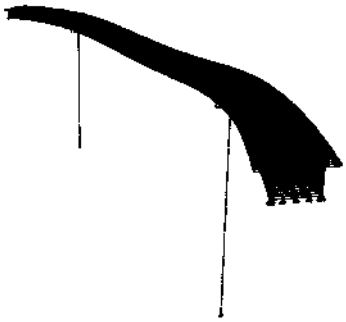


Figura 4.2.s *Modo 3: V – 1.3 s.*

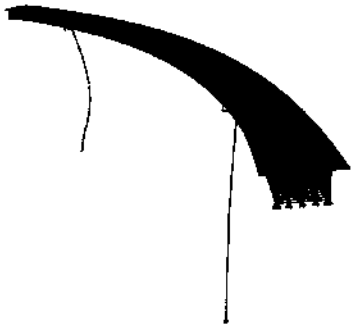


Figura 4.2.u *Modo 11: V – 0.39 s.*

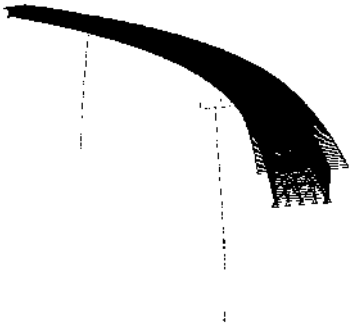


Figura 4.2.t *Modo 6: T – 0.78 s.*

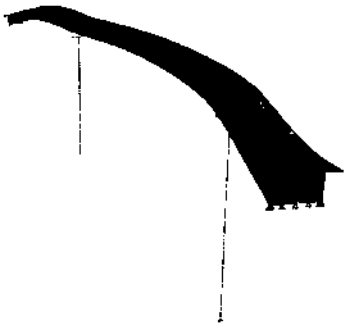


Figura 4.2.v *Modo 12: V – 0.36 s.*

Se realizaron dos análisis de historia en el tiempo con el registro sísmico de la estación Victoria ocurrido el 1 de mayo de 1996, en el primero se sometió al puente a únicamente las dos componentes horizontales del registro, y en el segundo se incluye también la componente vertical.

A continuación se muestran las figuras de cada una de las etapas constructivas así como los resultados de todas las relaciones consideradas. El valor resaltado en rojo es el valor máximo encontrado de cada sección estudiada, siempre y cuando el valor sea mayor al 10% de aumento.

- Etapa 1 (Puente B – E1)

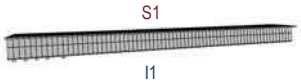


Figura 4.2.w *Partes analizadas del Puente B, etapa 1.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	0.9155	**1.1411**	0.1578	0.1825	0.1723	0.1599	-0.0146	-0.8175	0.9876	1.0194
I1	1.0662	**1.2366**	0.3085	0.2832	0.2893	0.2290	0.0191	-0.7168	1.0149	1.0441

	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23
S1	0.9153	1.0463	0.1766	0.1580	0.1930	0.1510	-0.0163	-0.8420	1.0942	1.0187
I1	1.0890	**1.8430**	0.3069	0.3250	0.2818	0.1763	0.0251	-0.6750	1.0196	**1.1264**

	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12
S1	0.6836	1.0333	0.1901	0.1180	0.2781	0.1142	-0.0880	-0.8820	0.9311	1.0034
I1	0.8896	1.0557	0.6971	0.1807	0.7837	0.1711	-0.0866	-0.8193	0.9515	1.0081

Tabla 4.2.a *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 1.*

- Etapa 2 (Puente B – E2)

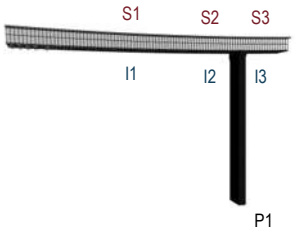


Figura 4.2.x *Partes analizadas del Puente B, etapa 2.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	1.0053	1.0834	0.2942	0.5174	0.2927	0.4776	0.0015	-0.4826	1.0012	1.0270
S2	0.8050	**1.1855**	0.2682	0.5060	0.3332	0.4268	-0.0650	-0.4940	0.9513	1.0555
S3	0.9398	1.0030	0.3559	0.0871	0.3787	0.0868	-0.0228	-0.9129	0.9835	1.0002
I1	0.9226	1.5397	0.1968	0.3933	0.2134	0.2554	-0.0165	-0.6067	0.9864	**1.1098**
I2	**1.3296**	**1.6455**	**2.7028**	0.0636	**2.0328**	0.0387	0.6700	-0.9364	**1.2209**	1.0240
I3	1.1065	1.2754	0.2243	0.2137	0.2027	0.1676	0.0216	-0.7863	1.0179	1.0395

	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23
S1	**1.1315**	1.0076	0.2632	**1.1024**	0.2326	1.0941	0.0306	0.1024	1.0248	1.0039
S2	0.6672	1.4349	0.2714	0.3868	0.4068	0.2696	-0.1354	-0.6132	0.9038	1.0923
S3	1.0627	**1.7025**	0.1397	0.5620	0.1315	0.3301	0.0082	-0.4380	1.0073	**1.1743**
I1	0.9339	1.0342	0.1968	0.1903	0.2107	0.1840	-0.0139	-0.8097	0.9885	1.0053
I2	0.8879	**1.5872**	0.2834	**1.4462**	0.3192	0.9111	-0.0358	0.4462	0.9729	**1.2799**
I3	**1.3526**	0.9191	0.1958	0.5482	0.1448	0.5965	0.0510	-0.4518	1.0446	0.9698

	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12
S1	1.0338	1.0326	0.3536	0.5234	0.3420	0.5069	0.0116	-0.4766	1.0086	1.0110
S2	0.8943	**2.5563**	0.2144	0.1593	0.2397	0.0623	-0.0254	-0.8407	0.9796	1.0913
S3	1.0558	0.9411	0.5303	0.3678	0.5023	0.3909	0.0280	-0.6322	1.0186	0.9834
I1	0.9301	0.9338	0.2057	0.1341	0.2212	0.1436	-0.0155	-0.8659	0.9873	0.9917
I2	1.2759	**1.6086**	0.0400	0.0937	0.0314	0.0583	0.0087	-0.9063	1.0084	1.0335
I3	**1.6091**	0.8283	0.1630	0.3345	0.1013	0.4039	0.0617	-0.6655	1.0560	0.9506

Tabla 4.2.b *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 2.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0056	**716.1111**	**712.0955**	**4.0156**	1.0056
Axial	**3.6783**	0.3223	0.0876	0.2347	**1.2158**
M_R	1.0033	112.2186	111.8476	0.3710	1.0033

Tabla 4.2.c *Resultados de la pila 1 del Puente B, etapa 2.*

- Etapa 3 (Puente B – E3)

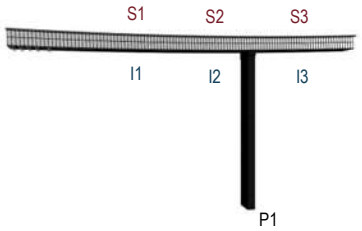


Figura 4.2.y *Partes analizadas del Puente B, etapa 3.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	1.0094	**1.3935**	0.3835	0.3343	0.3799	0.2399	0.0036	-0.6657	1.0026	1.0761
S2	0.8602	1.2753	0.2614	0.5672	0.3038	0.4448	-0.0425	-0.4328	0.9674	1.0847
S3	1.0581	1.0899	0.1384	0.1240	0.1308	0.1138	0.0076	-0.8760	1.0067	1.0092
I1	1.1297	**1.5382**	0.1828	0.3927	0.1618	0.2553	0.0210	-0.6073	1.0181	**1.1095**
I2	1.3054	1.4197	**2.4945**	0.0404	**1.9110**	0.0285	0.5835	-0.9596	**1.2005**	1.0116
I3	**1.3191**	1.4542	0.0922	0.1741	0.0699	0.1197	0.0223	-0.8259	1.0209	1.0486

	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23
S1	1.0251	1.0071	0.3525	0.5728	0.3438	0.5687	0.0086	-0.4272	1.0064	1.0026
S2	0.8738	0.8836	0.2794	0.2760	0.3198	0.3123	-0.0403	-0.7240	0.9694	0.9723
S3	0.8807	**3.1458**	0.0919	0.2947	0.1044	0.0937	-0.0124	-0.7053	0.9887	**1.1838**
I1	**1.1979**	1.0585	0.2029	0.1181	0.1693	0.1116	0.0335	-0.8819	1.0287	1.0059
I2	1.0077	**1.6374**	0.2075	0.8598	0.2059	0.5251	0.0016	-0.1402	1.0013	**1.2195**
I3	1.1628	1.0367	0.0900	0.1203	0.0774	0.1161	0.0126	-0.8797	1.0117	1.0038

	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12
S1	0.9454	0.9701	0.3585	0.4012	0.3792	0.4136	-0.0207	-0.5988	0.9850	0.9913
S2	**1.2985**	**1.5992**	0.2831	0.1014	0.2180	0.0634	0.0651	-0.8986	1.0534	1.0357
S3	1.2261	1.4355	0.1754	0.2302	0.1431	0.1604	0.0324	-0.7698	1.0283	1.0602
I1	1.1075	0.9368	0.2112	0.2224	0.1907	0.2374	0.0205	-0.7776	1.0172	0.9879
I2	**1.7646**	**1.5889**	0.0267	0.0587	0.0151	0.0369	0.0116	-0.9413	1.0114	1.0210
I3	0.8283	1.0342	0.0786	0.1212	0.0949	0.1172	-0.0163	-0.8788	0.9851	1.0036

Tabla 4.2.d *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 3.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M] / [(M+2C)/M]
V_R	1.000	**293.345**	**293.253**	0.092	1.000
Axial	**3.238**	0.266	0.082	0.184	**1.170**
M_R	0.999	118.751	118.830	-0.079	0.999

Tabla 4.2.e *Resultados de la pila 1 del Puente B, etapa 3.*

- Etapa 4 (Puente B – E4)

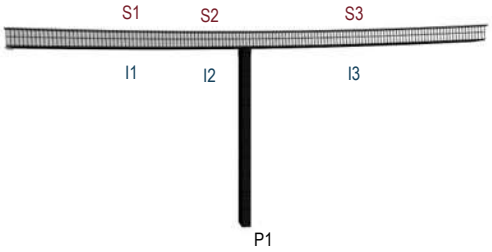


Figura 4.2.z *Partes analizadas del Puente B, etapa 4.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	0.9542	**1.1243**	0.9715	0.2648	1.0182	0.2355	-0.0467	-0.7352	0.9769	1.0237
S2	**3.6175**	1.0264	0.2186	0.4946	0.0604	0.4819	0.1582	-0.5054	**1.1492**	1.0086
S3	1.2688	1.1072	0.1830	0.0351	0.1442	0.0317	0.0388	-0.9649	1.0339	1.0033
I1	1.0267	1.0705	0.5570	1.0044	0.5425	0.9383	0.0145	0.0044	1.0094	1.0341
I2	1.0469	1.0384	**1.3617**	0.2613	**1.3007**	0.2516	0.0610	-0.7387	1.0265	1.0077
I3	**1.3694**	**1.6386**	0.0821	0.0965	0.0600	0.0589	0.0222	-0.9035	1.0209	1.0355

	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23
S1	1.0289	1.0065	0.5372	0.8809	0.5221	0.8753	0.0151	-0.1191	1.0099	1.0030
S2	1.0723	**1.1976**	0.5511	0.1890	0.5139	0.1578	0.0371	-0.8110	1.0245	1.0269
S3	1.0387	1.1399	0.1079	0.1755	0.1039	0.1540	0.0040	-0.8245	1.0036	1.0187
I1	1.0822	**1.2604**	0.3989	0.2339	0.3686	0.1855	0.0303	-0.7661	1.0221	1.0408
I2	0.9950	0.8778	0.2014	0.0222	0.2024	0.0253	-0.0010	-0.9778	0.9992	0.9970
I3	**1.8271**	1.0714	0.0928	0.0690	0.0508	0.0644	0.0420	-0.9310	1.0400	1.0043

	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12
S1	1.0158	0.9946	**1.4348**	0.5346	**1.4124**	0.5375	0.0223	-0.4654	1.0093	0.9981
S2	**1.4202**	1.2406	0.0477	0.0774	0.0336	0.0624	0.0141	-0.9226	1.0137	1.0141
S3	1.2996	**1.9737**	0.1300	0.0884	0.1001	0.0448	0.0300	-0.9116	1.0272	1.0417
I1	1.0461	0.9763	**1.9783**	0.6113	**1.8911**	0.6262	0.0871	-0.3887	1.0301	0.9909
I2	0.9919	1.0887	-0.2160	0.0509	0.1585	0.0468	-0.2160	-0.9491	0.9989	1.0040
I3	**1.3846**	0.9917	0.2720	0.0684	0.1965	0.0689	0.0755	-0.9316	1.0631	0.9995

Tabla 4.2.f *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 4.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0124	**18.0691**	**17.8479**	0.2212	1.0117
Axial	**1.4854**	0.1259	0.0848	0.0411	1.0379
M_R	1.0156	6.3619	6.2641	0.0978	1.0135

Tabla 4.2.g *Resultados de la pila 1 del Puente B, etapa 4.*

- Puente Terminado (Puente B – T)

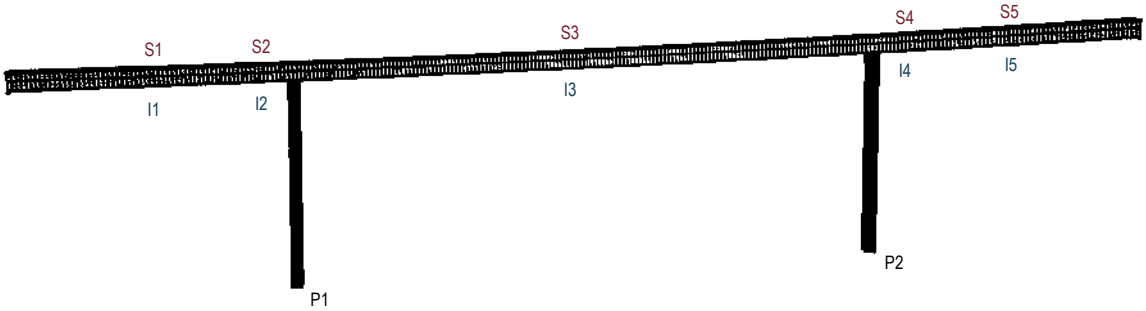


Figura 4.2.aa *Partes analizadas del Puente B terminado.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	1.0562	0.9729	0.5653	0.0930	0.5353	0.0956	0.0301	-0.9070	1.0196	0.9976
S2	**1.6488**	1.0588	0.0260	0.1344	0.0158	0.1270	0.0102	-0.8656	1.0101	1.0066

S3	1.1461	**1.2053**	0.1737	0.1621	0.1515	0.1345	0.0221	-0.8379	1.0192	1.0243
S4	1.3976	0.8093	0.0348	0.1481	0.0249	0.1830	0.0099	-0.8519	1.0097	0.9705
S5	1.0192	0.9420	0.4192	0.3603	0.4113	0.3825	0.0079	-0.6397	1.0056	0.9839
I1	0.8672	1.1239	0.3323	0.3157	0.3831	0.2809	-0.0509	-0.6843	0.9632	1.0272
I2	1.1292	1.1375	1.1059	0.3541	0.9793	0.3113	0.1266	-0.6459	1.0639	1.0326
I3	**1.2476**	1.0677	0.1909	0.5501	0.1530	0.5152	0.0379	-0.4499	1.0329	1.0230
I4	1.1118	**1.1346**	**1.3529**	0.2865	**1.2169**	0.2525	0.1361	-0.7135	1.0614	1.0271
I5	0.9014	1.0023	0.2659	0.3260	0.2950	0.3253	-0.0291	-0.6740	0.9775	1.0006

	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23	M22	V23
S1	1.0546	1.0410	0.6448	0.6360	0.6114	0.6109	0.0334	-0.3640	1.0207	1.0155
S2	1.0152	**1.3741**	0.1368	0.1091	0.1347	0.0794	0.0020	-0.8909	1.0018	1.0275
S3	**1.1443**	0.9122	0.7506	0.2027	0.6559	0.2223	0.0947	-0.7973	1.0572	0.9840
S4	0.8017	0.9172	0.6082	0.2443	0.7586	0.2664	-0.1504	-0.7557	0.9145	0.9826
S5	0.9097	0.9107	0.2697	0.5170	0.2965	0.5677	-0.0268	-0.4830	0.9794	0.9677
I1	0.8460	**1.3474**	0.3481	0.3693	0.4115	0.2741	-0.0634	-0.6307	0.9551	1.0747
I2	0.9098	0.8888	0.2084	0.0809	0.2291	0.0911	-0.0207	-0.9191	0.9832	0.9907
I3	1.0959	1.0003	0.2076	0.6552	0.1894	0.6550	0.0182	-0.3448	1.0153	1.0001
I4	1.0917	1.1043	0.2786	0.3967	0.2552	0.3592	0.0234	-0.6033	1.0186	1.0276
I5	0.8978	0.9928	0.2848	0.2610	0.3172	0.2629	-0.0324	-0.7390	0.9754	0.9985

	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12	M11	M12
S1	1.0783	1.0447	0.7176	0.2966	0.6655	0.2839	0.0521	-0.7034	1.0313	1.0099
S2	**1.6953**	**1.1851**	0.0251	0.1389	0.0148	0.1172	0.0103	-0.8611	1.0102	1.0194
S3	1.3083	1.0243	0.1040	0.0545	0.0795	0.0532	0.0245	-0.9455	1.0227	1.0012
S4	0.9753	0.7550	0.0598	0.2352	0.0613	0.3116	-0.0015	-0.7648	0.9986	0.9418
S5	1.1386	0.8071	1.0641	0.3269	0.9345	0.4051	0.1295	-0.6731	1.0670	0.9444
I1	1.0886	0.9801	0.7338	0.2850	0.6741	0.2907	0.0597	-0.7150	1.0357	0.9955
I2	**8.9950**	0.8879	0.1850	0.0552	0.0206	0.0622	0.1644	-0.9448	**1.1611**	0.9934
I3	1.2693	**1.1794**	0.1543	0.7087	0.1216	0.6009	0.0327	-0.2913	1.0292	1.0673
I4	1.0113	1.0909	0.2250	0.4004	0.2224	0.3671	0.0025	-0.5996	1.0021	1.0244
I5	0.8520	0.9073	0.4337	0.3106	0.5091	0.3423	-0.0754	-0.6894	0.9501	0.9764

Tabla 4.2.h *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 2.*

P1	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0149	133.9177	131.9455	1.9722	1.0148
Axial	**1.2093**	0.1869	0.1545	0.0323	1.0280
M_R	1.0112	**256.7047**	**253.8558**	**2.8489**	1.0112

Tabla 4.2.i *Resultados de la pila 1 del Puente B terminado.*

P2	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
V_R	1.0101	154.2089	152.6640	**1.5449**	1.0101
Axial	**1.7533**	0.1834	0.1046	0.0788	1.0713
M_R	1.0070	**197.3625**	**195.9923**	1.3702	1.0070

Tabla 4.2.j *Resultados de la pila 2 del Puente B terminado.*

En las siguientes tablas se muestra el valor máximo de los últimos dos índices, por las razones ya mencionadas en el puente anterior, y en que etapa se encuentran.

	(3C-2C)/M				[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA
S	0.1582	4	-0.4328	3	**1.1492**	4	1.0847	3
I	0.6700	2	0.0044	4	**1.2209**	2	**1.1098**	2

	M22	ETAPA	V23	ETAPA	M22	ETAPA	V23	ETAPA
S	0.0947	T	0.1024	2.0000	1.0942	1.0000	**1.1838**	3
I	0.0510	2	0.4462	2.0000	1.0446	2.0000	**1.2799**	2

	M11	ETAPA	M12	ETAPA	M11	ETAPA	M12	ETAPA
S	0.1295	T	-0.4654	4.0000	1.0670	T	1.0913	2
I	0.1644	T	-0.2913	T	**1.1611**	T	1.0673	T

Tabla 4.2.k *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente B.*

P1	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M] / [(M+2C)/M]	ETAPA
V_R	**4.0156**	2	1.0148	2
Axial	0.2347	2	**1.2158**	2
M_R	**2.8489**	T	1.0135	4

P2	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M] / [(M+2C)/M]	ETAPA
V_R	**1.5449**	T	1.0101	T
Axial	0.0788	T	1.0713	T
M_R	**1.3702**	T	1.0070	T

Tabla 4.2.I *Resultados máximos de las pilas del Puente B.*

En éste puente se puede observar que la componente vertical del sismo afecta más a las etapas 2 y 3. El puente terminado también se ve afectado, pero esto ocurre casi exclusivamente en las pilas, el tablero solamente se ve afectado en la sección I2 y solamente para el momento M11.

4.3. Puente voladizo balanceado

El puente estudiado mediante el método de voladizo balanceado es semejante al puente ubicado en el área Malakasi-Grevena de la autopista Egnatia Odos en Grecia. Consta de 3 claros, 2 de 94.5 m en los extremos y uno central de 160 m resultando una longitud total de 349 m. Sus 2 pilas son de sección hueca cuadrada de 6 x 6 m con 0.80 m de espesor y 58 m de altura. El puente está conformado por 56 dovelas de 4.6 m de longitud cada una, 4 de 6 m de longitud ubicada a cada lado de las pilas y una dovela de cierre de 4 m. Su sección transversal tiene una altura de 9 m en la sección superior de las pilas y una de 3.5 m en el centro del claro, el resto de sus dimensiones se encuentran en las figuras siguientes.

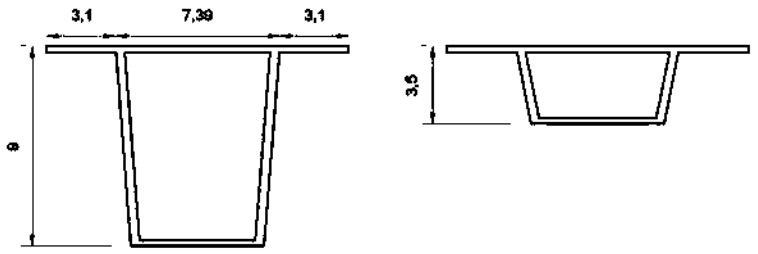


Figura 4.3.a *Dimensiones de la sección transversal del puente voladizo balanceado (m).*

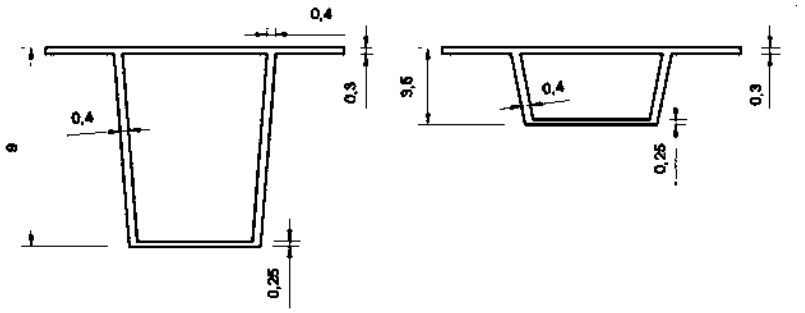


Figura 4.3.b *Espesores de la sección transversal del puente voladizo balanceado (m).*

A continuación se presenta una breve descripción de cada etapa así como los resultados obtenidos al realizar el análisis modal mediante el uso del programa Sap2000 (versión 14.2.0, 2010).

En la primera etapa se tiene construida la primera pila así como parte del tablero. El tablero tiene un voladizo de 24.4 m a ambos lados de la pila. A diferencia del resto de los modelos, las pilas de este puente se modelaron con elementos placa para facilitar la conexión pila-tablero y a su vez lograr estabilidad geométrica.

- Etapa 1 (Puente C – E1)

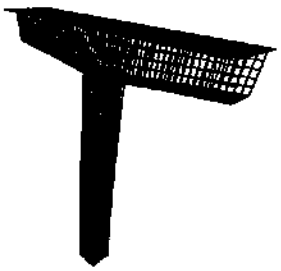


Figura 4.3.c *Modo 2: T – 1.85 s.*

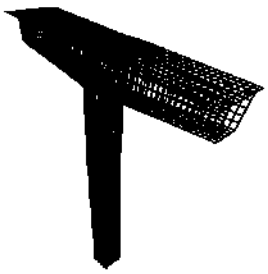


Figura 4.3.d *Modo 4: V – 0.48 s.*

Figura 4.3.e *Modo 6: $A_{A\text{-}V}$ – 0.17 s.*

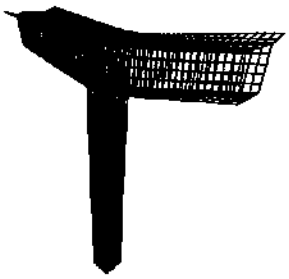


Figura 4.3.f *Modo 7: V – 0.17 s.*

Continuando con la construcción del tablero del puente en la etapa 2 se llega a un voladizo de 52 m, también por ambos lados.

- Etapa 2 (Puente C – E2)

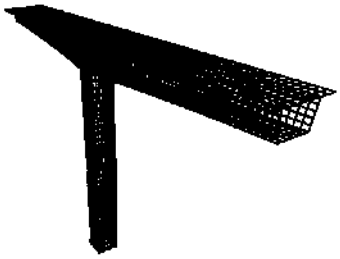


Figura 4.3.g *Modo 3: T – 2.4 s.*

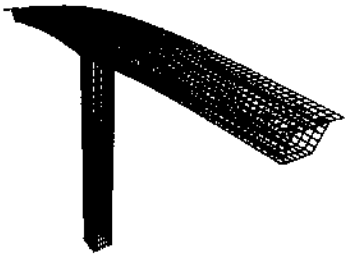


Figura 4.3.h *Modo 5: V – 0.55 s.*

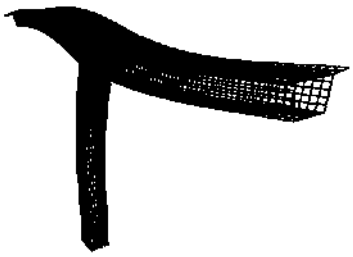


Figura 4.3.i *Modo 8: V – 0.21 s.*

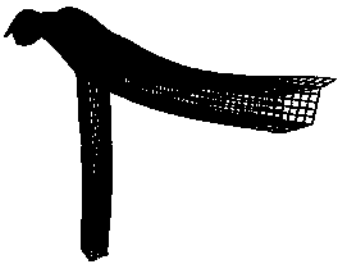


Figura 4.3.j *Modo 9: V – 0.16 s.*

En la etapa 3 de construcción el tablero cuenta con un voladizo de 75 m a ambos lados.

- Etapa 3 (Puente C – E3)

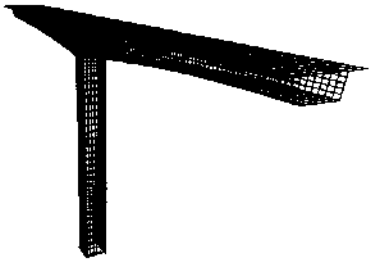


Figura 4.3.k *Modo 3: T – 2.80 s.*

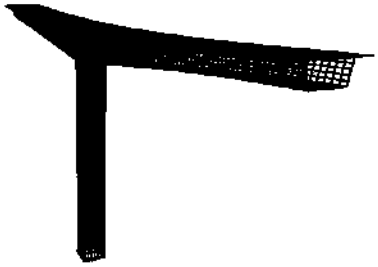


Figura 4.3.l *Modo 5: V – 1.15 s.*

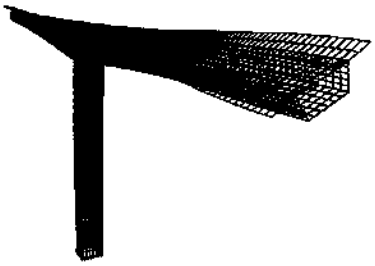


Figura 4.3.m *Modo 11: Tor. – 0.21 s.*

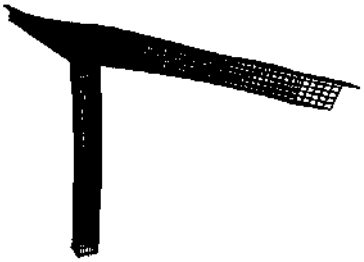


Figura 4.3.n *Modo 12: Tor. – 0.20 s.*

La cuarta etapa es asimétrica, de un lado el tablero tiene una longitud total de 91.5 m el cual alcanza a estar apoyado en el estribo mientras que en el otro se tiene una longitud de tablero de 75 m en voladizo, la mitad del claro mayor.

- Etapa 4 (Puente C – E4)

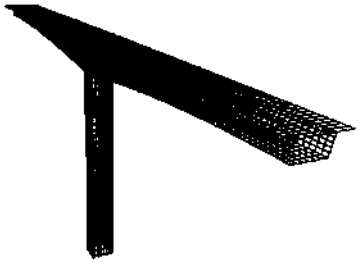


Figura 4.3.o *Modo 1: T – 2.78 s.*

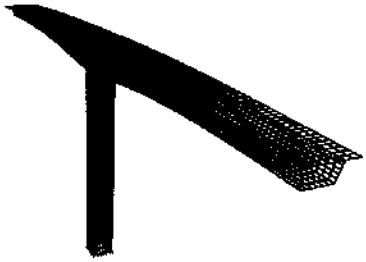


Figura 4.3.p *Modo 2: V – 1.54 s.*

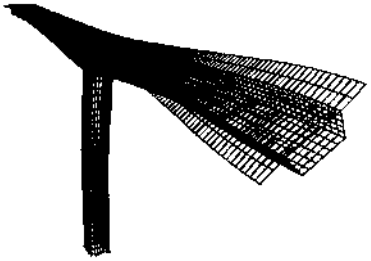


Figura 4.3.q *Modo 10: Tor. – 0.21 s.*

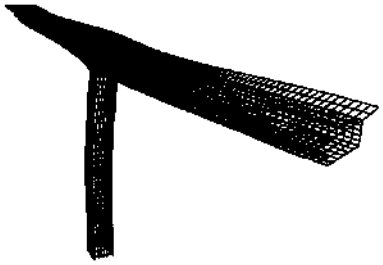


Figura 4.3.r *Modo 11: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.1 s.*

La quinta etapa corresponde al puente terminado.

- Puente Terminado (Puente C – T)

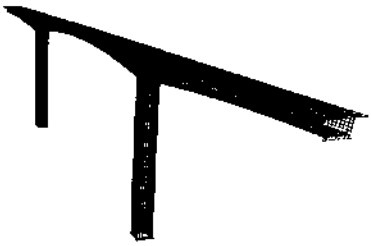


Figura 4.3.s *Modo 1: T – 2.33 s.*

Figura 4.3.t *Modo 3: V – 1.26 s.*

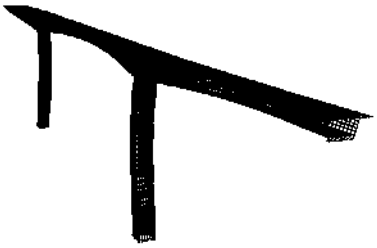


Figura 4.3.u *Modo 11: Tor. – 0.29 s.*

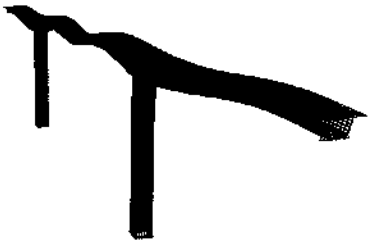


Figura 4.3.v *Modo 12: V – 0.28 s.*

Las placas analizadas del tablero se ubican en su centro transversal, tanto de la losa superior como inferior. De forma longitudinal las placas analizadas se ubican al centro de cada sección agregada al avanzar en las etapas de construcción así como al inicio y al final de cada sección. En la siguiente figura se muestra la sección transversal de la pila y la posición de los nodos analizados en la base.

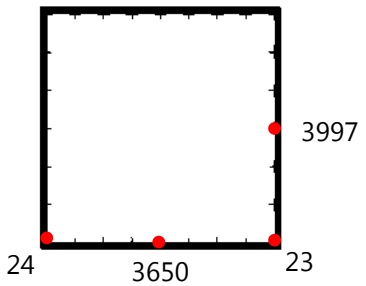


Figura 4.3.w *Pila vista en planta, posición de nodos analizados (en rojo).*

Después de la figura de cada etapa constructiva se presentan los resultados de cada relación considerada, al igual que los puentes anteriores.

- Etapa 1 (Puente C – E1)

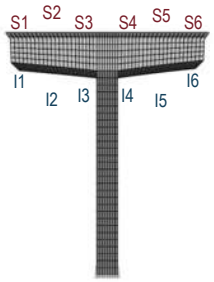


Figura 4.3.x *Partes analizadas del Puente C, etapa 1.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S1	1.4193	1.0000	0.4455	0.4891	0.3139	0.4891	0.1316	0.0000	1.1002	1.0000
S2	1.4914	1.0000	0.4147	**27.6744**	0.2781	**27.6744**	0.1366	0.0000	1.1069	1.0000
S3	**3.5881**	1.0000	0.5746	3.6933	0.1601	3.6933	0.4145	0.0000	**1.3572**	1.0000
S4	1.9950	1.0000	0.5169	3.2062	0.2591	3.2062	0.2578	0.0000	1.2047	1.0000
S5	1.4330	1.0000	0.4587	16.2587	0.3201	16.2587	0.1386	0.0000	1.1050	1.0000
S6	1.6061	1.0000	0.5384	0.4969	0.3352	0.4969	0.2032	0.0000	1.1522	1.0000
I1	1.2276	1.1208	0.6305	0.3138	0.5136	0.2800	0.1169	0.0338	1.0772	1.0264
I2	1.4627	0.9858	0.3644	0.1790	0.2491	0.1816	0.1153	-0.0026	1.0923	0.9978
I3	1.0054	0.9730	**2.9205**	0.7318	**2.9048**	0.7521	0.0157	-0.0203	1.0040	0.9884

I4	1.0624	1.0956	2.1160	**1.2592**	1.9917	**1.1493**	0.1243	0.1099	1.0415	1.0511
I5	**1.7369**	1.2235	0.5283	0.1900	0.3042	0.1553	0.2242	0.0347	1.1719	1.0300
I6	1.7050	**1.6634**	0.8914	0.2906	0.5228	0.1747	0.3686	0.1159	**1.2420**	1.0987

Tabla 4.3.a *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 1.*

	3C/2C				3C/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	0.9954	1.0000	0.9898	1.0102	9.3782	71.7802	8.4043	**17.6507**
F2	0.9952	1.0055	0.9899	1.0000	9.2881	17.2176	8.3745	DIV/0
F3	0.9957	1.0143	0.9903	1.0275	9.6963	7.0597	8.6567	6.8306
M1	0.9957	1.0158	0.9900	1.0000	9.7895	6.4614	8.3456	DIV/0
M2	1.0103	0.9972	0.9900	1.0304	9.4542	**662.9834**	8.4523	6.2337
M3	1.0028	1.0000	1.0129	1.0000	**23.0345**	71.8132	**28.8252**	DIV/0

	2C/M				(3C-2C)/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	9.4220	71.7802	8.4912	**17.4726**	-0.0438	0.0000	-0.0869	0.1781
F2	9.3334	17.1228	8.4602	DIV/0	-0.0453	0.0949	-0.0857	DIV/0
F3	9.7379	6.9599	8.7412	6.6481	-0.0415	0.0998	-0.0845	0.1825
M1	9.8317	6.3606	8.4300	DIV/0	-0.0422	0.1008	-0.0844	DIV/0
M2	9.3581	**664.8250**	8.5380	6.0499	0.0961	-1.8416	-0.0857	0.1837
M3	**22.9694**	71.8132	**28.4580**	DIV/0	0.0651	0.0000	0.3672	DIV/0

	[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	24	3650	23	3997
F1	0.9958	1.0000	0.9908	1.0096
F2	0.9956	1.0052	0.9909	0.0000
F3	0.9961	1.0125	0.9913	1.0239
M1	0.9961	1.0137	0.9911	0.0000
M2	1.0093	0.9972	0.9910	1.0261
M3	1.0027	1.0000	1.0125	0.0000

Tabla 4.3.b *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 1.*

- Etapa 2 (Puente C – E2)

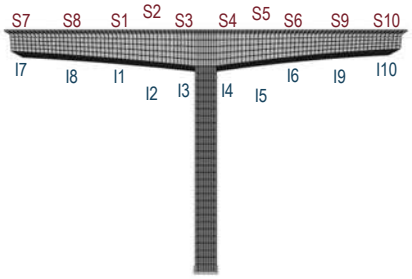


Figura 4.3.y *Partes analizadas del Puente C, etapa 2.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S7	1.1116	1.0000	0.3311	0.3123	0.2979	0.3123	0.0332	0.0000	1.0256	1.0000
S8	1.1413	1.0000	0.3373	5.3382	0.2956	5.3382	0.0418	0.0000	1.0322	1.0000
S1	1.3676	1.0000	0.2205	20.4773	0.1612	20.4773	0.0593	0.0000	1.0510	1.0000
S2	2.2504	1.0000	0.3953	20.7431	0.1756	20.7431	0.2196	0.0000	**1.1868**	1.0000
S3	1.7284	1.0000	0.4143	2.5048	0.2397	2.5048	0.1746	0.0000	1.1409	1.0000
S4	0.9819	1.0000	0.4627	**39.2016**	0.4712	**39.2016**	-0.0085	0.0000	0.9942	1.0000
S5	**2.3132**	1.0000	0.3813	12.1141	0.1648	12.1141	0.2164	0.0000	1.1858	1.0000
S6	0.9741	1.0000	0.2235	3.7310	0.2294	3.7310	-0.0060	0.0000	0.9952	1.0000
S9	0.9211	1.0000	0.4548	2.7863	0.4937	2.7863	-0.0390	0.0000	0.9739	1.0000
S10	1.0671	1.0000	0.4910	0.3764	0.4601	0.3764	0.0309	0.0000	1.0211	1.0000
I7	1.1202	**1.1922**	0.4825	0.1745	0.4307	0.1464	0.0518	0.0281	1.0362	1.0245
I8	1.3378	1.0394	0.3942	0.2281	0.2947	0.2195	0.0995	0.0086	1.0769	1.0071
I1	1.3754	1.0204	0.2666	0.2492	0.1938	0.2443	0.0728	0.0050	1.0610	1.0040
I2	**2.0020**	0.9907	0.5335	0.2982	0.2665	0.3009	0.2670	-0.0028	1.2108	0.9979
I3	0.9787	0.9687	1.7846	1.1653	1.8234	1.2030	-0.0388	-0.0376	0.9863	0.9829
I4	0.9879	1.1244	**2.8102**	**2.7748**	**2.8445**	**2.4678**	-0.0344	0.3070	0.9911	1.0885
I5	1.8984	1.0002	1.1012	0.3672	0.5801	0.3671	0.5212	0.0001	**1.3298**	1.0001
I6	1.1371	1.0540	0.3133	0.2384	0.2755	0.2262	0.0378	0.0122	1.0296	1.0100
I9	0.9867	1.1008	0.4050	0.1761	0.4104	0.1600	-0.0054	0.0161	0.9961	1.0139
I10	1.0659	1.0772	0.6948	0.2585	0.6519	0.2400	0.0429	0.0185	1.0260	1.0149

Tabla 4.3.c *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 2.*

	3C/2C				3C/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	1.0026	0.9991	0.9960	0.9862	6.5908	13.1265	10.8754	**12.7324**
F2	0.9860	0.9973	0.9956	1.0000	5.8622	17.8580	10.1887	DIV/0
F3	1.0027	1.0027	0.9964	0.9751	6.4449	10.5620	11.0236	5.0422
M1	1.0025	1.0025	0.9957	1.0000	6.3246	4.2549	10.2399	DIV/0
M2	0.9937	0.0304	0.9961	0.9734	6.8338	**136.0234**	11.0384	4.6620
M3	0.9987	0.5740	1.0022	1.0000	**19.7365**	13.1202	**129.4630**	DIV/0

	2C/M				(3C-2C)/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	6.5735	13.1381	10.9188	**12.9103**	0.0173	-0.0116	-0.0434	-0.1779
F2	5.9454	17.9057	10.2335	DIV/0	-0.0832	-0.0476	-0.0447	DIV/0
F3	6.4273	10.5332	11.0639	5.1710	0.0176	0.0288	-0.0404	-0.1288
M1	6.3091	4.2445	10.2837	DIV/0	0.0155	0.0104	-0.0438	DIV/0
M2	6.8772	**4471.2008**	11.0817	4.7895	-0.0434	-4335.1774	-0.0433	-0.1274
M3	**19.7616**	22.8585	**129.1801**	DIV/0	-0.0251	-9.7384	0.2829	DIV/0

	[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	24	3650	23	3997
F1	1.0023	0.9992	0.9964	0.9872
F2	0.9880	0.9975	0.9960	0.0000
F3	1.0024	1.0025	0.9967	0.9791
M1	1.0021	1.0020	0.9961	0.0000
M2	0.9945	0.0306	0.9964	0.9780
M3	0.9988	0.5918	1.0022	0.0000

Tabla 4.3.d *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 2.*

- Etapa 3 (Puente C – E3)

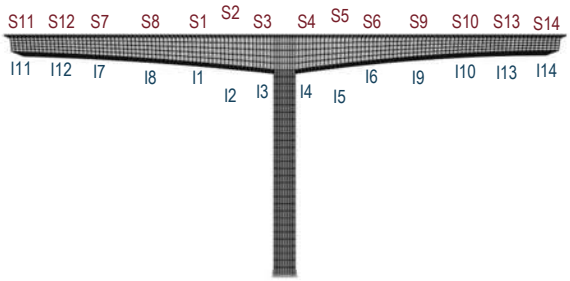


Figura 4.3.z *Partes analizadas del Puente C, etapa 3.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S11	0.9366	1.0000	0.2496	0.2625	0.2496	0.2625	-0.0169	0.0000	0.9867	1.0000
S12	0.9298	1.0000	0.2848	0.6644	0.2848	0.6644	-0.0215	0.0000	0.9835	1.0000
S7	1.1346	1.0000	0.2459	0.6755	0.2459	0.6755	0.0292	0.0000	1.0240	1.0000
S8	1.2232	1.0000	0.2132	1.6964	0.2132	1.6964	0.0389	0.0000	1.0331	1.0000
S1	1.0268	1.0000	0.2217	5.5935	0.2159	5.5935	0.0058	0.0000	1.0048	1.0000
S2	1.4551	1.0000	0.2931	**6.7965**	0.2931	**6.7965**	0.0917	0.0000	1.0763	1.0000
S3	1.1847	1.0000	0.3413	2.5824	0.3413	2.5824	0.0532	0.0000	1.0413	1.0000
S4	1.0141	1.0000	0.5002	5.8213	0.5002	5.8213	0.0069	0.0000	1.0047	1.0000
S5	**1.5317**	1.0000	0.3269	4.4183	0.3269	4.4183	0.1135	0.0000	1.0935	1.0000
S6	1.0681	1.0000	0.2639	1.5261	0.2639	1.5261	0.0168	0.0000	1.0135	1.0000
S9	1.1825	1.0000	0.2350	0.7853	0.2350	0.7853	0.0363	0.0000	1.0303	1.0000
S10	1.0366	1.0000	0.2494	0.5203	0.2494	0.5203	0.0088	0.0000	1.0071	1.0000
S13	1.0131	1.0000	0.3625	0.4590	0.3625	0.4590	0.0047	0.0000	1.0035	1.0000
S14	1.0596	1.0000	0.3470	0.3103	0.3470	0.3103	0.0195	0.0000	1.0147	1.0000
I11	1.0132	1.0470	0.3902	0.1623	0.3902	0.1623	0.0051	0.0073	1.0037	1.0063
I12	0.8840	0.8963	0.2814	0.1345	0.2814	0.1345	-0.0369	-0.0156	0.9720	0.9865
I7	**1.3207**	0.9392	0.2326	0.1666	0.2326	0.1666	0.0565	-0.0108	1.0480	0.9908
I8	0.9719	1.0128	0.2191	0.2339	0.2191	0.2339	-0.0063	0.0030	0.9948	1.0024
I1	1.1384	1.0065	0.6492	0.3974	0.6492	0.3974	0.0789	0.0025	1.0503	1.0018
I2	1.1294	1.0292	4.1343	0.5784	4.1343	0.5784	0.4735	0.0164	**1.1016**	1.0105
I3	1.0079	0.9987	1.9590	1.3208	1.9590	1.3208	0.0153	-0.0017	1.0052	0.9993
I4	1.0000	1.0063	2.5449	**2.0248**	2.5449	**2.0248**	0.0000	0.0127	1.0000	1.0042

I5	0.9794	1.1847	0.3572	0.1222	0.3572	0.1222	-0.0075	0.0191	0.8229	1.0173
I6	0.9990	1.0534	0.6509	0.1494	0.6509	0.1494	-0.0007	0.0076	0.9996	1.0066
I9	1.0763	1.0021	**7.4919**	0.2432	**7.4919**	0.2432	0.5312	0.0005	1.0667	1.0004
I10	1.1015	0.9944	0.3017	0.1301	0.3017	0.1301	0.0278	-0.0007	1.0218	0.9994
I13	1.0064	**1.2982**	0.3621	0.1155	0.3621	0.1155	0.0023	0.0265	1.0017	1.0244
I14	1.0579	1.0547	0.5077	0.1694	0.5077	0.1694	0.0278	0.0088	1.0188	1.0076

Tabla 4.3.e *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 3.*

	3C/2C				3C/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	1.0030	0.9882	1.0085	1.0115	6.5841	8.7843	12.1731	**11.5457**
F2	1.0035	1.0027	1.0099	1.0000	5.6727	15.2098	11.5889	DIV/0
F3	1.0032	1.0072	1.0090	1.0251	6.2929	6.9053	12.5786	2.9491
M1	1.0032	1.0080	1.0091	1.0000	6.1357	6.4040	12.1633	DIV/0
M2	1.0031	1.0059	1.0088	1.0163	6.1733	**81.7912**	12.2760	2.5800
M3	0.9949	0.9884	1.0081	1.0000	**15.7167**	8.7697	**3889.3805**	DIV/0

	2C/M				(3C-2C)/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	6.5647	8.8889	12.0707	**11.4148**	0.0194	-0.1046	0.1024	0.1309
F2	5.6531	15.1693	11.4752	DIV/0	0.0196	0.0405	0.1138	DIV/0
F3	6.2730	6.8561	12.4666	2.8768	0.0199	0.0492	0.1120	0.0723
M1	6.1159	6.3532	12.0538	DIV/0	0.0197	0.0508	0.1095	DIV/0
M2	6.1544	**81.3137**	12.1690	2.5387	0.0189	0.4775	0.1070	0.0413
M3	**15.7972**	8.8730	**3898.2301**	DIV/0	-0.0805	-0.1033	-8.8496	DIV/0

	[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	24	3650	23	3997
F1	1.0026	0.9894	1.0078	1.0105
F2	1.0029	1.0025	1.0091	1.0000
F3	1.0027	1.0063	1.0083	1.0186
M1	1.0028	1.0069	1.0084	1.0000

M2	1.0026	1.0058	1.0081	1.0117
M3	0.9952	0.9895	0.9977	1.0000

Tabla 4.3.f *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 3.*

- Etapa 4 (Puente C – E4)

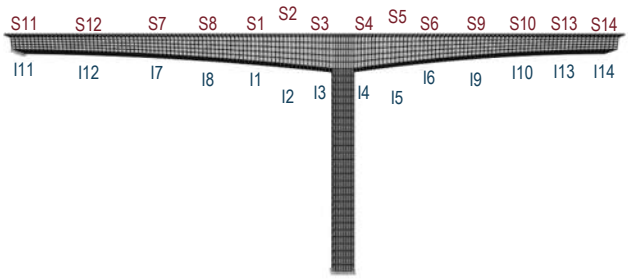


Figura 4.3.aa *Partes analizadas del Puente C, etapa 4.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S11	1.1417	1.0000	**1.4090**	3.2517	**1.2341**	3.2517	0.1748	0.0000	1.0783	1.0000
S12	0.7984	1.0000	0.6822	28.7545	0.8544	28.7545	-0.1722	0.0000	0.9071	1.0000
S7	0.9529	1.0000	0.8792	3.6917	0.9227	3.6917	-0.0434	0.0000	0.9774	1.0000
S8	0.9593	1.0000	0.8703	7.1984	0.9072	7.1984	-0.0369	0.0000	0.9806	1.0000
S1	0.9608	1.0000	0.6518	30.7669	0.6784	30.7669	-0.0266	0.0000	0.9842	1.0000
S2	1.5055	1.0000	0.7709	**154.1652**	0.5120	**154.1652**	0.2588	0.0000	1.1712	1.0000
S3	**2.8184**	1.0000	0.7527	1.6678	0.2671	1.6678	0.4857	0.0000	**1.3833**	1.0000
S4	2.1310	1.0000	0.3455	1.8973	0.1621	1.8973	0.1834	0.0000	1.1578	1.0000
S5	1.7229	1.0000	0.4455	12.2889	0.2586	12.2889	0.1869	0.0000	1.1485	1.0000
S6	1.3957	1.0000	0.3589	1.9366	0.2572	1.9366	0.1018	0.0000	1.0809	1.0000
S9	1.0722	1.0000	0.3082	1.5095	0.2874	1.5095	0.0208	0.0000	1.0161	1.0000
S10	1.5683	1.0000	0.3228	0.5859	0.2058	0.5859	0.1170	0.0000	1.0970	1.0000
S13	0.9649	1.0000	0.2332	0.6354	0.2417	0.6354	-0.0085	0.0000	0.9932	1.0000
S14	0.8779	1.0000	0.3311	0.6023	0.3772	0.6023	-0.0461	0.0000	0.9665	1.0000
I11	1.0063	0.9224	0.9355	0.3159	0.9297	0.3425	0.0058	-0.0266	1.0030	0.9802
I12	1.2163	0.9928	0.4679	0.1552	0.3847	0.1563	0.0832	-0.0011	1.0601	0.9990
I7	0.9655	1.0409	0.6120	0.0756	0.6338	0.0727	-0.0218	0.0030	0.9866	1.0028

I8	0.9106	1.0179	0.7462	0.2039	0.8195	0.2003	-0.0733	0.0036	0.9597	1.0030
I1	0.9253	1.0562	0.7029	0.3400	0.7597	0.3219	-0.0568	0.0181	0.9677	1.0137
I2	1.2099	1.0056	0.8031	0.5742	0.6638	0.5710	0.1393	0.0032	1.0837	1.0021
I3	**1.4789**	**2.6287**	1.7636	0.5928	1.1925	0.2255	0.5711	0.3673	1.2605	**1.2997**
I4	1.0371	0.9767	0.2217	0.6255	0.2138	0.6404	0.0079	-0.0149	0.9181	0.9909
I5	1.4309	0.8893	0.2266	0.1995	0.1583	0.2243	0.0682	-0.0248	0.4190	0.9797
I6	1.0152	0.9835	0.3982	0.3135	0.3922	0.3188	0.0059	-0.0053	1.0043	0.9960
I9	1.3316	1.1158	**14.8008**	0.5918	**11.1150**	0.5304	**3.6858**	0.0614	**1.3042**	1.0401
I10	1.3377	1.0901	0.7419	0.3274	0.5546	0.3003	0.1873	0.0271	1.1205	1.0208
I13	1.1233	1.0689	0.2483	0.2140	0.2211	0.2002	0.0273	0.0138	1.0223	1.0115
I14	0.8842	0.9048	0.4995	0.1849	0.5649	0.2044	-0.0654	-0.0194	0.9582	0.9839

Tabla 4.3.g *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 4.*

	3C/2C				3C/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	0.9994	1.0220	0.9945	1.0076	3.6795	5.9382	51.4216	**2.8361**
F2	1.0311	1.0044	0.9987	1.0000	2.2232	**12.7680**	20.7535	DIV/0
F3	1.0218	1.0116	0.9968	1.0290	3.0600	5.3372	25.7760	2.2861
M1	0.9982	1.0150	0.9922	1.0000	3.3484	4.8942	**68.6610**	DIV/0
M2	1.0249	1.0320	0.9998	1.0351	2.7887	4.1473	16.3157	1.5549
M3	0.9894	1.0220	1.0148	1.0000	**10.1055**	5.9454	10.0951	DIV/0

	2C/M				(3C-2C)/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	3.6818	-6.4403	51.7059	**2.7711**	-0.0023	-0.0982	-0.2843	0.0650
F2	2.1562	**12.7122**	20.7814	DIV/0	0.0670	0.0558	-0.0279	DIV/0
F3	2.9947	5.2762	25.8583	2.2216	0.0653	0.0610	-0.0823	0.0645
M1	3.3543	4.8219	**69.1991**	DIV/0	-0.0059	0.0722	-0.5381	DIV/0
M2	2.7208	4.0953	16.3193	1.5022	0.0678	0.0520	-0.0036	0.0527
M3	**10.2359**	6.0437	9.9483	DIV/0	-0.1305	-0.0983	0.1468	DIV/0

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	24	3650	23	3997
F1	0.9995	0.9860	0.9946	1.0172
F2	1.0212	1.0041	0.9987	0.0000
F3	1.0164	1.0097	0.9969	1.0200
M1	0.9986	1.0124	0.5379	0.0000
M2	1.0182	1.0102	0.9998	1.0211
M3	0.9884	0.9860	-5.2776	0.0000

Tabla 4.3.h *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 4.*

- Puente Terminado (Puente C – T)

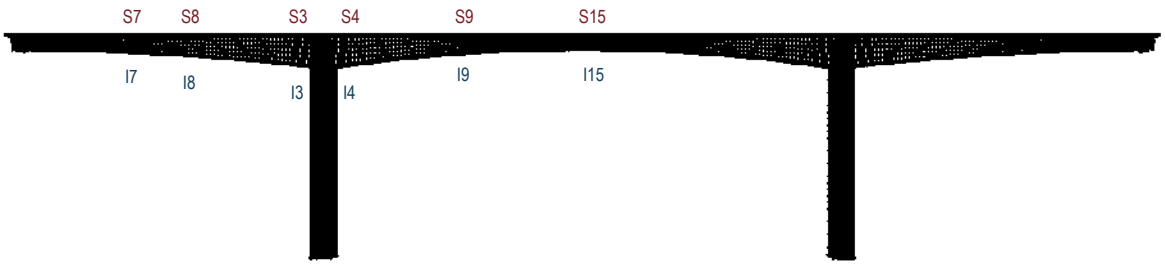


Figura 4.3.ab *Partes analizadas del Puente C terminado.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax	Mmax	Vmax
S7	0.9743	1.0000	1.0114	7.3885	1.0381	7.3885	-0.0267	0.0000	0.9869	1.0000
S8	1.0298	1.0000	1.0531	**11.2178**	1.0226	**11.2178**	0.0305	0.0000	1.0151	1.0000
S3	3.1750	1.0000	0.7131	2.8640	0.2246	2.8640	0.4885	0.0000	**1.3989**	1.0000
S4	4.2314	1.0000	0.4439	1.7947	0.1049	1.7947	0.3390	0.0000	1.3068	1.0000
S9	1.9651	1.0000	0.4868	2.0420	0.2477	2.0420	0.2391	0.0000	1.1916	1.0000
S15	**9.2891**	1.0000	0.2553	4.8080	0.0275	4.8080	0.2278	0.0000	1.2218	1.0000
I7	0.9560	1.0365	0.8419	0.1010	0.8807	0.0974	-0.0388	0.0036	0.9794	1.0032
I8	1.0249	1.1111	1.1005	0.2698	1.0737	0.2428	0.0268	0.0270	1.0129	1.0217
I3	1.0560	**2.3135**	**3.7662**	0.7979	**3.5665**	0.3449	0.1996	0.4530	1.0437	**1.3368**
I4	1.1326	1.3514	0.2177	0.8948	0.1922	0.6621	0.0255	0.2327	0.8977	1.1400
I9	2.0184	1.1205	1.0157	0.2940	0.5032	0.2624	0.5125	0.0316	**1.3409**	1.0250

I15	**12.8050**	1.4437	0.2937	0.3769	0.0229	0.2611	0.2707	0.1158	1.2647	1.0919

Tabla 4.3.i *Resultados de elementos en tablero del Puente C terminado.*

	3C/2C				3C/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	0.9734	0.9701	1.0100	1.0279	4.0877	5.5706	22.6166	**190.0217**
F2	0.9642	0.9951	1.0030	1.0000	2.8777	**14.4666**	17.6080	DIV/0
F3	0.9712	0.9877	1.0058	0.9977	3.6948	5.8354	19.3523	14.8224
M1	0.9697	0.9866	1.0057	1.0000	3.6220	5.3291	**23.9707**	DIV/0
M2	0.9727	0.9569	**1.6007**	1.0025	3.7215	3.3730	15.1999	8.2457
M3	1.0089	0.9748	0.9869	1.0000	**9.5055**	5.5778	10.4953	DIV/0

	2C/M				(3C-2C)/M			
	24	3650	23	3997	24	3650	23	3997
F1	4.1993	5.7422	22.3936	**4.1605**	-0.1117	-0.1716	0.2231	0.1161
F2	2.9845	**14.5377**	17.5561	DIV/0	-0.1068	-0.0711	0.0519	DIV/0
F3	3.8044	5.9079	19.2412	2.2234	-0.1095	-0.0725	0.1111	-0.0051
M1	3.7350	5.4014	**23.8343**	DIV/0	-0.1130	-0.0722	0.1364	DIV/0
M2	3.8257	3.5250	9.4955	1.5692	-0.1043	-0.1521	**5.7043**	0.0040
M3	**9.4214**	5.7223	10.6341	DIV/0	0.0842	-0.1445	-0.1388	DIV/0

	[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	24	3650	23	3997
F1	0.9785	0.9745	1.0095	1.0225
F2	0.9732	0.9954	1.0028	0.0000
F3	0.9772	0.9895	1.0055	0.9984
M1	0.9761	0.9887	1.0055	0.0000
M2	0.9784	0.9664	**1.5435**	1.0015
M3	1.0081	0.9785	0.9881	0.0000

Tabla 4.3.j *Resultados de la pila 1 del Puente C terminado.*

A continuación se muestran los valores máximos que resultaron de las dos últimas relaciones así como la etapa en la cual se encuentran.

	(3C-2C)/M				[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA
S	0.4885	T	0	X	**1.3989**	4	1	X
I	**3.6858**	4	0.4530	T	**1.3409**	T	**1.3368**	T

Tabla 4.3.k *Resultados de elementos en tablero del Puente C terminado.*

P1	3C/2C	ETAPA	[(M+3C)/M] / [(M+2C)/M]	ETAPA
F1	0.2231	T	1.0225	T
F2	0.1138	3	1.0212	4
F3	0.1825	1	1.0239	1
M1	0.1364	T	1.0137	1
M2	**5.7043**	T	**1.5435**	T
M3	0.3672	1	1.0125	1

Tabla 4.3.l *Resultados de la pila 1 del Puente C terminado.*

De forma general el puente balanceado se ve más afectado por la componente vertical en el tablero que en la pila. Las etapas más afectadas son la etapa 1, 4 y el puente terminado. El tablero del puente es el que resulta más afectado por la componente vertical, mientras que el aumento en los elementos mecánicos de las pilas no es importante (menor al 10%) sino hasta el puente terminado.

4.4. Puente en arco

El puente en arco está construido casi totalmente de acero a excepción de las pilas que se encuentran fuera del arco, en los accesos. Consta de un claro principal de 289.5 m y una altura en el centro del arco de 45.7 m (ver Figura 4.4.a). El puente es semejante al Puente Rainbow que conecta a Niagara Falls, Nueva York, EEUU y a Niagara Falls, Ontario, Canadá.

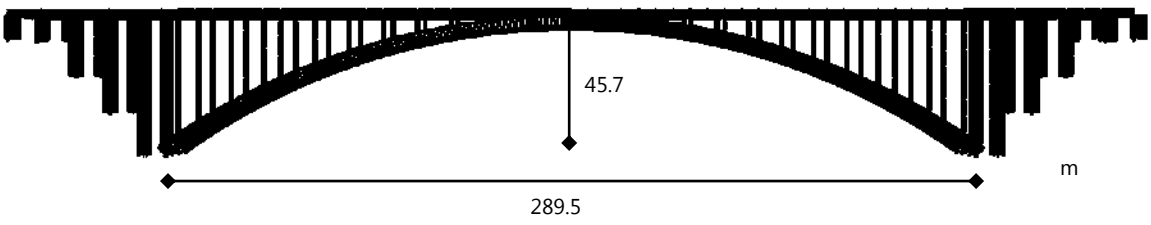


Figura 4.4.a *Dimensiones de arco.*

Cada segmento del arco está formado por dos elementos metálicos huecos de 0.91 m de ancho por 3.66 m de altura con espesor de 100 mm unidos mediante elementos metálicos en sección tipo "L" de 180 x 180 mm con espesor de 30 mm (elementos de color rojo de la figura 4.4.b), otros de 155 x 155 mm con espesor de 25mm (elementos azules cortos de la figura 4.4.b) y finalmente otros de 450 x 450 mm con espesor de 50 mm (elementos azules largos de la figura 4.4.b). El arco tiene un ancho total de 17.91 m.

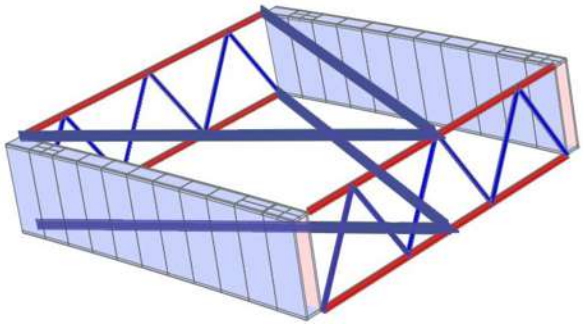


Figura 4.4.b *Segmento de arco.*

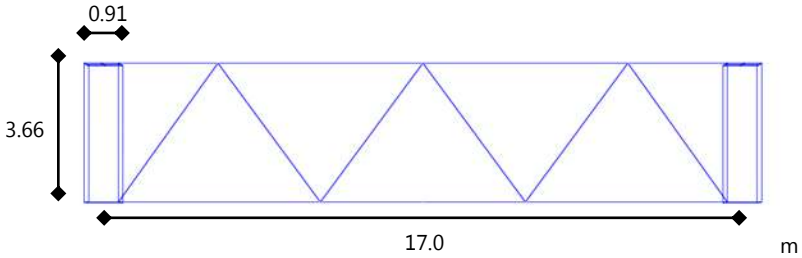


Figura 4.4.c *Dimensiones de la sección transversal del arco.*

Las pilas de acero, las cuales están apoyadas sobre el arco, son de sección hueca de 0.9 x 1 m y con espesor de 0.2 m. Las pilas de concreto, las cuales se encuentran en los accesos, también son de sección hueca de 3 m x 3.5 m.

Durante su construcción es necesario emplear una torre provisional de donde se anclan cables para poder sostener el arco antes de haber cerrado. Para este puente se empleó una torre de 39 m de altura construida de acero. La sección transversal de la torre es hueca y mide 4.5 x 3 m con 300 mm de espesor. La torre cuenta con 3 elementos horizontales de acero al igual que cables colocados en forma diagonal en el mismo plano de la torre con la finalidad de rigidizarla.

Durante la construcción de este puente se emplearon cables de acero con 3 diferentes espesores. El espesor chico es de un diámetro de 40 mm, el mediano de 80 mm y el grande de 120 mm. Se tienen 6 cables anclados del terreno hacia la torre (5 grandes y 1 chico) y otros 6 cables que van desde la torre hacia el puente (2 medianos y 4 chicos). Los 4 cables utilizados para rigidizar la torre son de grosor grande.

A continuación se presenta una descripción de cada una de las etapas de construcción, además de los resultados del análisis modal realizado en cada una de ellas.

En la primera etapa de construcción se tienen construidas las pilas de concreto, la torre provisional, y los 4 primeros segmentos del arco sostenidos por un par de conjunto de cables anclados a cada lado del arco.

- Etapa 1 (Puente D – E1)

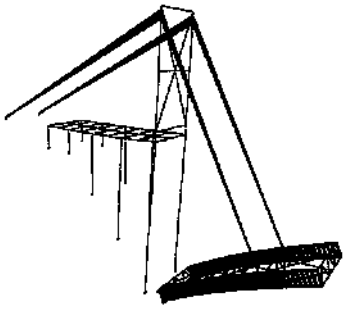


Figura 4.4.d *Modo 1: T – 1.70 s.*

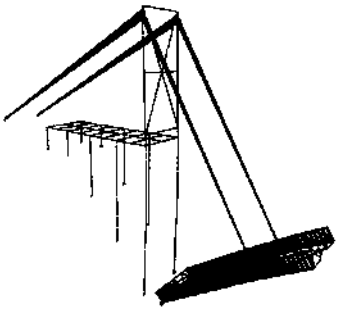


Figura 4.4.e *Modo 2: V – 0.50 s.*

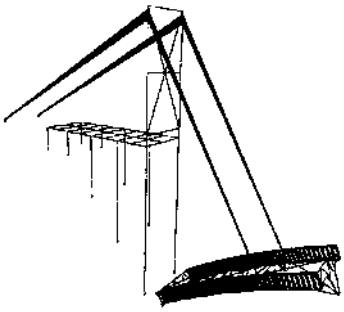


Figura 4.4.f *Modo 11: V – 0.22 s.*

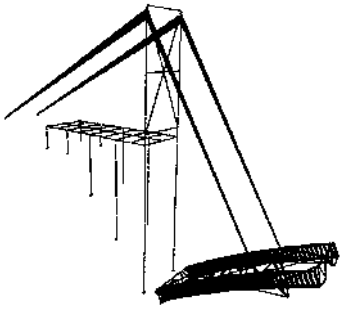


Figura 4.4.g *Modo 12: V – 0.22 s.*

A la etapa 2 se le agregaron 2 segmentos de arco al igual que otros dos conjuntos de cables delanteros.

- Etapa 2 (Puente D – E2)

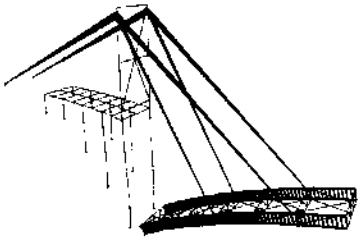


Figura 4.4.h *Modo 1: T – 1.70 s.*

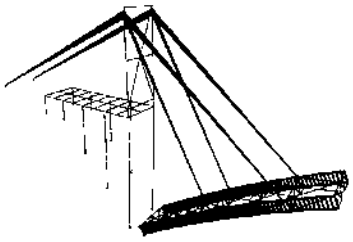


Figura 4.4.i *Modo 2: V – 0.63 s.*

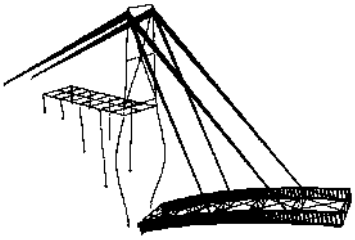


Figura 4.4.j *Modo 11: Tor. – 0.22 s.*

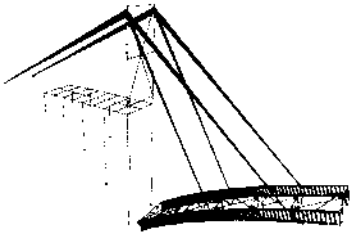


Figura 4.4.k *Modo 12: V – 0.22 s.*

La etapa 3 consiste de un total de 8 segmentos de arco y 6 conjuntos de cables.

- Etapa 3 (Puente D – E3)

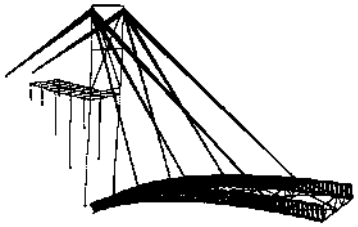


Figura 4.4.l *Modo 1: T – 1.70 s.*

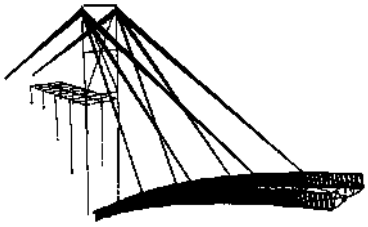


Figura 4.4.m *Modo 2: V – 0.79 s.*

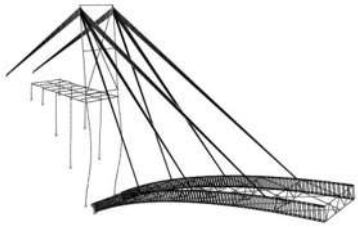


Figura 4.4.n *Modo 11: A_{A-V} – 0.25 s.*

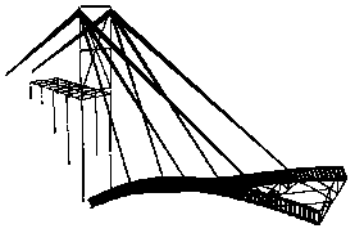


Figura 4.4.o *Modo 12: Tor. – 0.23 s.*

La etapa cuatro es la etapa justo antes de cerrar el arco, consta de un total de 12 segmentos de arco y 8 conjuntos de cables.

- Etapa 4 (Puente D – E4)

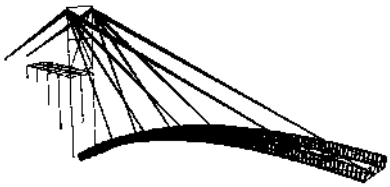


Figura 4.4.p *Modo 1: T – 1.77 s.*

Figura 4.4.r *Modo 11: $A_{Tor.-T}$ – 0.30 s.*

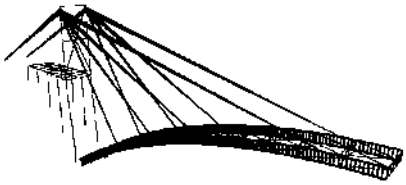


Figura 4.4.q *Modo 3: V – 1.23 s.*

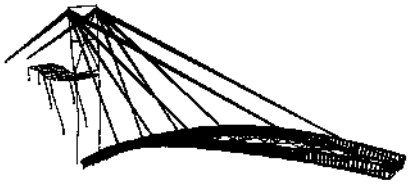


Figura 4.4.s *Modo 12: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.28 s.*

En la última etapa se coloca el segmento que cierra el arco haciendo posible retirar el conjunto de cables que sostenían al arco al igual que la torre provisional. Además se colocan todas las pilas de acero que se ubican encima del arco y se termina de la construcción del tablero del puente.

- Puente Terminado (Puente D – T)

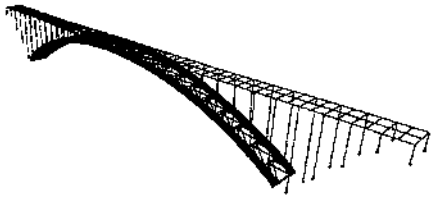


Figura 4.4.t *Modo 1: T – 1.91 s.*

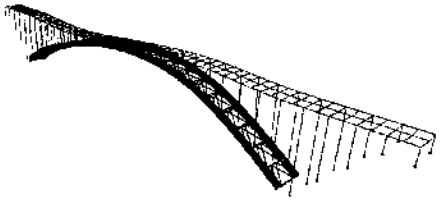


Figura 4.4.u *Modo 3: V – 1.05 s.*

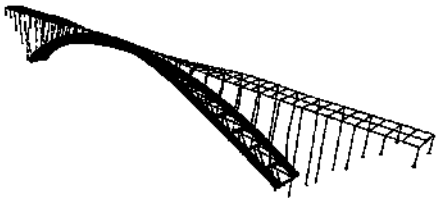


Figura 4.4.v *Modo 11: Tor. – 0.51 s.*

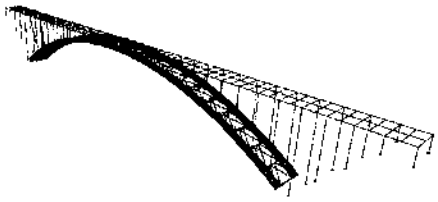


Figura 4.4.w *Modo 12: T – 0.50 s.*

De igual forma que en los puentes anteriores se realizaron dos análisis, en el primero se sometió al puente a únicamente las dos componentes horizontales del registro, y en el segundo se incluye también la componente vertical.

Las placas analizadas se ubican en la parte superior e inferior de las dos secciones de arco. De forma longitudinal se analizaron las secciones a cada 3 segmentos de arco. Además se analizaron

las tensiones de los cables superiores de cada conjunto de cables, la base de la pila temporal y la base de la pila permanente más alta.

A continuación se presentan las figuras de cada etapa constructiva así como los resultados de cada relación considerada.

- Etapa 1 (Puente D – E1)

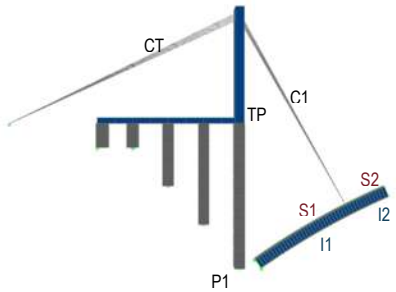


Figura 4.4.x *Partes analizadas del Puente D, etapa 1.*

	3C/2C				3C/M			
	S1	I1	S2	I2	S1	I1	S2	I2
Vmax	1.0000	1.0343	1.0024	**1.1887**	0.5599	0.3906	0.1460	2.9664
Mmax	1.0120	0.9899	0.9998	1.0180	**1.3425**	-0.7448	0.8206	**36.0745**

	2C/M				(3C-2C)/M			
	S1	I1	S2	I2	S1	I1	S2	I2
Vmax	0.5599	0.3776	0.1457	2.4955	0.0000	0.0129	0.0004	0.4709
Mmax	**1.3265**	-0.7524	0.8208	**35.4362**	0.0160	0.0076	-0.0002	0.6383

	[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	S1	I1	S2	I2
Vmax	1.0000	1.0094	1.0003	1.0071
Mmax	1.0069	1.0308	0.9999	1.0175

Tabla 4.4.a *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 1.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	C1	CT	C1	CT	C1	CT	C1	CT	C1	CT
Pmax	1.0086	0.9104	**1.1377**	**1.6357**	**1.1280**	**1.7967**	0.0097	-0.1610	1.0046	0.9424

Tabla 4.4.b *Resultados de cables del Puente D, etapa 1.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	P1	TP	P1	TP	P1	TP	P1	TP	P1	TP
Axial	0.9851	0.9998	2.0643	1.6461	2.0956	1.6464	-0.0313	-0.0004	0.9899	0.9999
$V_{max\ 2-2}$	1.0030	1.0045	5.0793	3.4549	5.0641	3.4395	0.0151	0.0154	1.0025	1.0035
$M_{max\ 2-2}$	0.9974	1.0000	56.3102	1.1911	56.4555	1.1911	-0.1453	0.0000	0.8446	1.0012
$V_{max\ 3-3}$	0.8445	1.0013	**16978.5**	**80.9**	**20104.0**	**80.8**	-3125.4	0.1068	0.9974	1.0000
$M_{max\ 3-3}$	1.0034	1.0079	4.2746	1.4382	4.2602	1.4269	0.0145	0.0113	1.0028	1.0047

Tabla 4.4.c *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 1.*

- Etapa 2 (Puente D – E2)

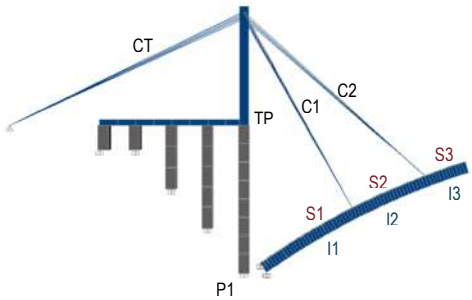


Figura 4.4.y *Partes analizadas del Puente D, etapa 2.*

3C/2C

	S1	I1	S2	I2	S3	I3
Vmax	1.0030	1.0532	**1.3724**	0.9899	0.9833	0.9746
Mmax	0.9834	0.8825	0.9199	1.0062	1.0065	0.9911

3C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3
Vmax	0.5030	0.4278	-0.0213	0.6113	0.3092	2.2231

Mmax	**1.1976**	-0.3387	0.3948	-0.4502	1.0356	**40.7042**

2C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3
Vmax	0.5015	0.4062	-0.0155	0.6175	0.3145	2.2810
Mmax	1.2179	-0.3838	0.4292	-0.4474	1.0290	**41.0704**

(3C-2C)/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3
Vmax	0.0015	0.0216	-0.0058	-0.0062	-0.0052	-0.0579
Mmax	-0.0203	0.0451	-0.0344	-0.0028	0.0067	-0.3662

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S1	I1	S2	I2	S3	I3
Vmax	1.0010	1.0154	0.9941	0.9961	0.9960	0.9824
Mmax	0.9909	1.0732	0.9760	0.9950	1.0033	0.9913

Tabla 4.4.d *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 2.*

	3C/2C			3C/M		
	C1	C2	CT	C1	C2	CT
Pmax	0.9966	0.9716	0.9844	**1.2223**	**1.7777**	**1.5530**

	2C/M			(3C-2C)/M		
	C1	C2	CT	C1	C2	CT
Pmax	**1.2265**	**1.8296**	**1.5777**	-0.0041	-0.0520	-0.0247

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C1	C2	CT
Pmax	0.9981	0.9816	0.9904

Tabla 4.4.e *Resultados de cables del Puente D, etapa 2.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		((3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	P1	TP	P1	TP	P1	TP	P1	TP	P1	TP
Axial	1.0043	1.0150	2.0075	1.6437	1.9988	1.6194	0.0087	0.0243	1.0029	1.0093
$V_{max\ 2-2}$	0.9947	1.0092	5.3742	3.2865	5.4026	3.2564	-0.0284	0.0301	0.9956	1.0071
$M_{max\ 2-2}$	0.9935	0.9995	58.3365	1.2149	58.7156	1.2155	-0.3791	-0.0006	0.9970	0.9995
$V_{max\ 3-3}$	0.9970	0.9994	**20949.2**	**81.2926**	**21012.4**	**81.3412**	-63.17	-0.0486	0.9936	0.9995
$M_{max\ 3-3}$	0.9934	1.0236	4.4937	1.5030	4.5238	1.4684	-0.0301	0.0346	0.9946	1.0140

Tabla 4.4.f *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 2*.

- Etapa 3 (Puente D – E3)

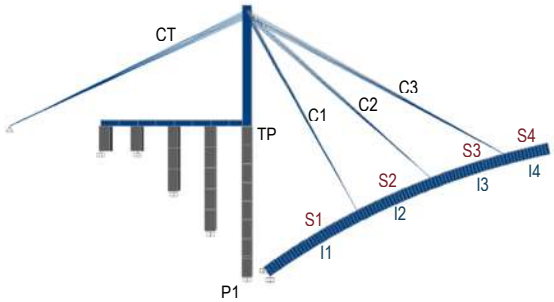


Figura 4.4.z *Partes analizadas del Puente D, etapa 3.*

3C/2C

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4
Vmax	1.0192	0.9833	0.9851	1.0075	0.9962	1.0033	1.0085	1.0198
Mmax	1.0035	0.9558	1.1083	0.9729	1.0099	0.9860	1.0004	1.0075

3C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4
Vmax	0.7770	0.3796	0.0160	0.3508	0.3764	0.3379	0.2934	1.5958
Mmax	**1.2556**	-0.3900	0.7378	-0.4262	**1.1840**	-0.5497	1.0220	**22.4885**

2C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4
Vmax	0.7623	0.3860	0.0162	0.3482	0.3778	0.3368	0.2909	1.5648
Mmax	**1.2512**	-0.4080	0.6657	-0.4381	**1.1724**	-0.5575	1.0216	**22.3218**

(3C-2C)/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4
Vmax	0.0147	-0.0065	-0.0002	0.0026	-0.0014	0.0011	0.0025	0.0310
Mmax	0.0044	0.0180	0.0721	0.0119	0.0116	0.0078	0.0004	0.1667

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4
Vmax	1.0083	0.9953	0.9998	1.0019	0.9990	1.0008	1.0019	1.0121
Mmax	1.0019	1.0305	1.0433	1.0211	1.0053	1.0176	1.0002	1.0071

Tabla 4.4.g *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 3.*

	3C/2C				3C/M			
	C1	C2	C3	CT	C1	C2	C3	CT
Pmax	0.9924	0.9909	1.0055	0.9825	**1.1875**	**1.4558**	**1.5815**	**1.6569**

	2C/M				(3C-2C)/M			
	C1	C2	C3	CT	C1	C2	C3	CT
Pmax	**1.1967**	**1.4692**	**1.5729**	**1.6864**	-0.0091	-0.0134	0.0086	-0.0295

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C1	C2	C3	CT
Pmax	0.9958	0.9946	1.0033	0.9890

Tabla 4.4.h *Resultados de cables del Puente D, etapa 3.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	P1	TP	P1	TP	P1	TP	P1	TP	P1	TP
Axial	1.0171	1.0251	1.7802	1.4836	1.7502	1.4473	0.0299	0.0363	1.0109	1.0148
$V_{max\ 2\text{-}2}$	1.0070	1.0162	5.9111	2.7801	5.8702	2.7359	0.0408	0.0442	1.0059	1.0118
$M_{max\ 2\text{-}2}$	0.9981	1.0002	64.8966	1.2502	65.0212	1.2499	-0.1247	0.0002	0.9994	1.0001
$V_{max\ 3\text{-}3}$	0.9994	1.0001	**23260.0**	**79.8944**	**23273.6**	**79.8851**	-13.69	0.0093	0.9981	1.0002
$M_{max\ 3\text{-}3}$	1.0079	1.0368	4.9647	1.4314	4.9256	1.3806	0.0391	0.0508	1.0066	1.0213

Tabla 4.4.i *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 3.*

- Etapa 4 (Puente D – E4)

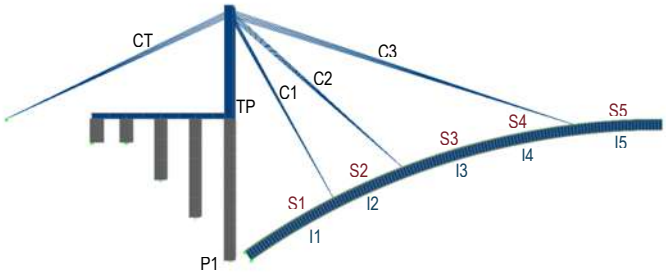


Figura 4.4.aa *Partes analizadas del Puente D, etapa 4.*

3C/2C

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	1.0017	1.0073	1.0022	1.0120	1.0004	1.0087	1.0017	1.0061	1.0075	1.0023
Mmax	1.0023	1.0097	0.9947	1.0518	1.0052	1.0484	1.0069	0.9891	1.0070	1.0323

	S6	I6
Vmax	1.0031	0.9878
Mmax	0.9991	1.0106

3C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	0.4698	0.3898	0.0250	0.4704	0.4698	0.4768	0.7478	0.3916	0.6264	0.3511
Mmax	**1.3031**	-0.4671	0.5229	-0.3098	**1.2985**	-0.3063	**1.1872**	-0.3736	**1.3642**	-0.5117

	S6	I6
Vmax	0.3470	**1.7942**
Mmax	0.9682	**54.0395**

2C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	0.4689	0.3870	0.0250	0.4648	0.4696	0.4727	0.7465	0.3892	0.6217	0.3503
Mmax	**1.3001**	-0.4626	0.5257	-0.2946	**1.2918**	-0.2921	**1.1791**	-0.3777	**1.3547**	-0.4957

	S6	I6
Vmax	0.3459	**1.8163**

Mmax	0.9691	**53.4746**

(3C-2C)/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	0.0008	0.0028	0.0001	0.0056	0.0002	0.0041	0.0012	0.0024	0.0047	0.0008
Mmax	0.0030	-0.0045	-0.0028	-0.0152	0.0067	-0.0141	0.0081	0.0041	0.0095	-0.0160

	S6	I6
Vmax	0.0011	-0.0221
Mmax	-0.0009	0.5650

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	1.0006	1.0020	1.0001	1.0038	1.0001	1.0028	1.0007	1.0017	1.0029	1.0006
Mmax	1.0013	0.9917	0.9982	0.9784	1.0029	0.9800	1.0037	1.0066	1.0040	0.9682

	S6	I6
Vmax	1.0008	0.9921
Mmax	0.9995	1.0104

Tabla 4.4.j *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 4.*

	3C/2C					3C/M				
	C1	C2	C3	C4	CT	C1	C2	C3	C4	CT
Pmax	0.9969	0.9766	0.9754	1.0626	1.0178	**1.4482**	**1.9447**	**1.6262**	**1.2744**	**1.2063**

	2C/M					(3C-2C)/M				
	C1	C2	C3	C4	CT	C1	C2	C3	C4	CT
Pmax	**1.4527**	**1.9914**	**1.6672**	**1.1993**	**1.1852**	-0.0044	-0.0467	-0.0410	0.0751	0.0211

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C1	C2	C3	C4	CT
Pmax	0.9982	0.9844	0.9846	1.0342	1.0097

Tabla 4.4.k *Resultados de cables del Puente D, etapa 4.*

	3C/2C		3C/M		2C/M		(3C-2C)/M		[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	
	P1	PT	P1	PT	P1	PT	P1	PT	P1	PT
Axial	1.0370	1.0389	1.6786	1.4279	1.6188	1.3745	0.0598	0.0535	1.0229	1.0225
$V_{max\ 2-2}$	0.9877	0.9958	8.8143	1.9206	8.9242	1.9287	-0.1099	-0.0082	0.9889	0.9972
$M_{max\ 2-2}$	0.9998	0.9996	92.5148	1.3673	92.5296	1.3678	-0.0148	-0.0005	1.0001	0.9985
$V_{max\ 3-3}$	1.0001	0.9983	**31304.8**	**87.1265**	**31302.8**	**87.2778**	**2.0000**	-0.1513	0.9998	0.9996
$M_{max\ 3-3}$	0.9850	1.0211	7.2845	1.8150	7.3956	1.7775	-0.1111	0.0375	1.0001	1.0135

Tabla 4.4.l *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 4.*

- Puente Terminado (Puente D – T)

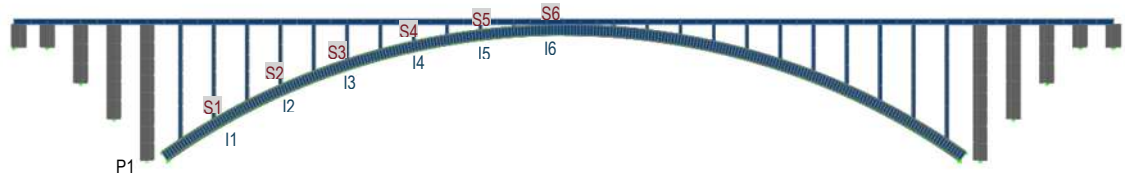


Figura 4.4.ab *Partes analizadas del Puente D terminado.*

3C/2C

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	1.0004	1.0048	1.0023	1.0376	0.9939	0.9794	0.9918	0.9836	0.9859	0.9768
Mmax	1.0069	0.9882	0.9920	1.0027	0.9891	0.9941	0.9899	1.0038	1.0044	1.0022

	S6	I6
Vmax	1.0364	1.0150
Mmax	0.9909	1.0714

3C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	0.0503	-0.1679	0.3787	-0.1192	0.8454	-0.1576	0.3997	-0.2033	0.3427	-0.2296
Mmax	**2.1975**	**2.2750**	**3.4775**	**2.1697**	**1.7645**	**1.3576**	-0.0711	**1.1748**	**1.5805**	**1.1849**

	S6	I6
Vmax	0.0193	**1.5840**

Mmax	0.2361	0.9511

2C/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	0.0503	-0.1671	0.3778	-0.1149	0.8506	-0.1609	0.4030	-0.2067	0.3476	-0.2350
Mmax	**2.1823**	**2.3023**	**3.5056**	**2.1639**	**1.7840**	**1.3656**	-0.0718	**1.1704**	**1.5736**	**1.1824**

	S6	I6
Vmax	0.0187	**1.5607**
Mmax	0.2383	0.8877

(3C-2C)/M

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	0.0000	-0.0008	0.0009	-0.0043	-0.0052	0.0033	-0.0033	0.0034	-0.0049	0.0055
Mmax	0.0151	-0.0273	-0.0281	0.0058	-0.0195	-0.0080	0.0007	0.0044	0.0069	0.0026

	S6	I6
Vmax	0.0007	0.0233
Mmax	-0.0022	0.0634

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S1	I1	S2	I2	S3	I3	S4	I4	S5	I5
Vmax	1.0000	0.9990	1.0006	0.9951	0.9972	1.0040	0.9976	1.0043	0.9964	1.0071
Mmax	1.0048	0.9917	0.9938	1.0018	0.9930	0.9966	1.0008	1.0020	1.0027	1.0012

	S6	I6
Vmax	1.0007	1.0091
Mmax	0.9982	1.0336

Tabla 4.4.m *Resultados de elementos en tablero del Puente D terminado.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M] / [(M+2C)/M]
	P1	P1	P1	P1	P1
Axial	**1.3407**	**1.5956**	**1.1901**	0.4054	**1.1851**
$V_{max\ 2-2}$	0.9849	**47.3450**	**48.0725**	-0.7275	0.9852
$M_{max\ 2-2}$	1.0083	**1.5554**	**1.5426**	0.0128	1.0052
$V_{max\ 3-3}$	1.0054	**435.8304**	**433.4891**	**2.3413**	1.0080
$M_{max\ 3-3}$	0.9894	**61.1292**	**61.7810**	-0.6518	0.9896

Tabla 4.4.n *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D terminado.*

En las siguientes 3 tablas se presenta el valor máximo obtenido de las ultimas dos relaciones y la etapa en la que se encuentra.

	(3C-2C)/M				[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA
S	0.0721	3	0.0147	3	1.0433	3	1.0083	3
I	0.6383	1	0.4709	1	1.0732	2	1.0154	2

Tabla 4.4.o *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente D.*

C	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
Pmax	0.0751	4	1.0342	4

Tabla 4.4.p *Resultados máximos de cables del Puente D.*

P1	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
Axial	0.4054	T	1.1851	T
$V_{max\ 2-2}$	0.0408	3	1.0059	3
$M_{max\ 2-2}$	0.0128	T	1.0052	T
$V_{max\ 3-3}$	2.3413	T	1.0080	T
$M_{max\ 3-3}$	0.0391	3	1.0066	3

PT	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
Pmax	0.0535	4	1.0225	4
$V_{max\ 2-2}$	0.0442	3	1.0118	3
$M_{max\ 2-2}$	0.0002	3	1.0012	1
$V_{max\ 3-3}$	0.1068	1	1.0002	3
$M_{max\ 3-3}$	0.0508	3	1.0213	3

Tabla 4.4.q *Resultados máximos de pilas del Puente D.*

Como se observa en las tablas anteriores, este puente se ve afectado muy poco por la componente vertical, la única etapa que se ve afectada es la del puente terminado, en la pila 1.

4.5. Puente atirantado

El puente atirantado que se analizó es semejante al puente Barrios de Luna ubicado en España, está formado por un claro principal de 440 m y dos claros de compensación de 66.74 m de longitud. Los claros de compensación se encuentran balanceados mediante un contrapeso de concreto de 32 m de longitud, su ubicación se muestra en la Figura 4.5.a.

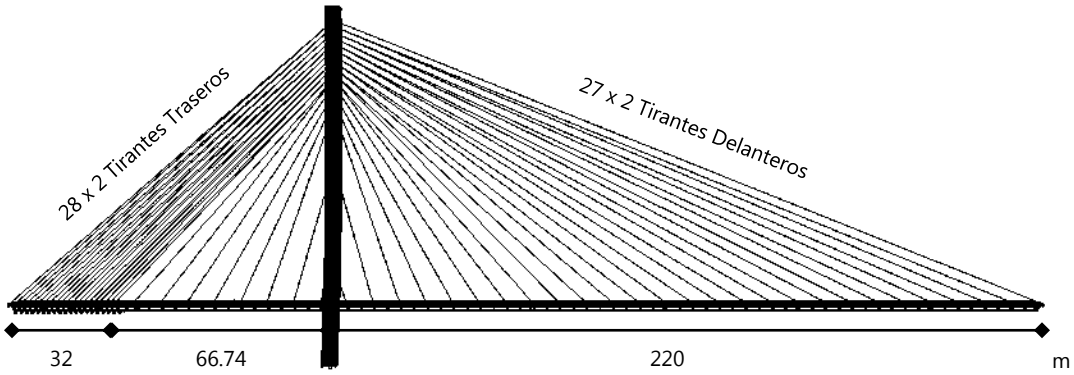


Figura 4.5.a *Dimensiones de claros del puente atirantado.*

Los tirantes están formados por torones de acero de 15 mm de diámetro. De acuerdo a la posición en el tablero, existen tirantes que contienen 24 torones hasta los más gruesos con 76 torones de acero. En total suman 14 los tirantes de diferente grosor, los diámetros de cada uno de ellos se pueden observar en la siguiente tabla.

Diámetro de Tirantes Utilizados (mm)														
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Ø	73.1	79	85.2	90.3	95.1	99.7	104	108.2	112.3	116.2	119.9	123.6	127.2	130.6

Los tirantes más delgados se anclaron al tablero en su parte más cercana a la torre mientras los más gruesos son los más alejados a la torre (tirantes de mayor longitud). Se colocaron 2 pares de tirantes del mismo grosor hacia cada lado de la torre hasta cubrir los claros.

El tablero está compuesto por dovelas de 4.08 m de longitud con un diafragma de 20 cm de espesor colocado entre cada una de ellas. El espesor de la losa superior es de 20 cm a excepción de las almas inclinadas que es de 24 cm. El resto de las dimensiones del tablero se encuentran en la siguiente figura.

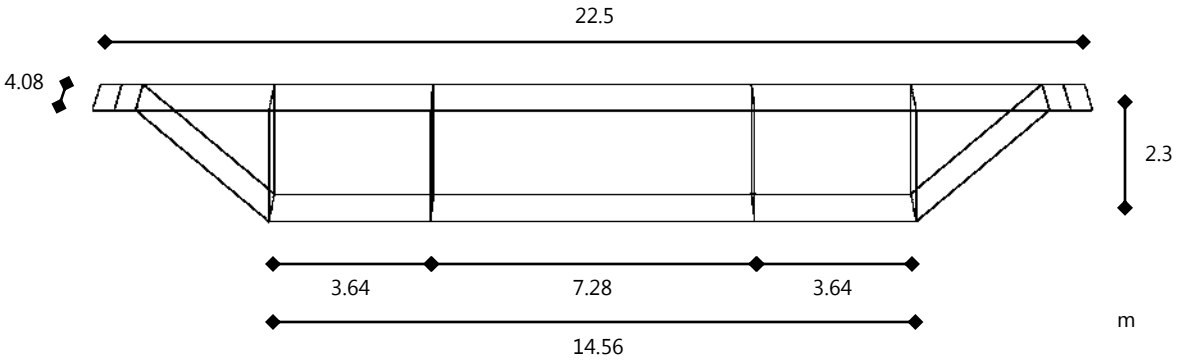


Figura 4.5.b *Dimensiones del tablero del puente atirantado.*

La torre tiene una altura sobre el nivel del tablero de 90 m y presenta la forma mostrada en la Figura 4.5.c.

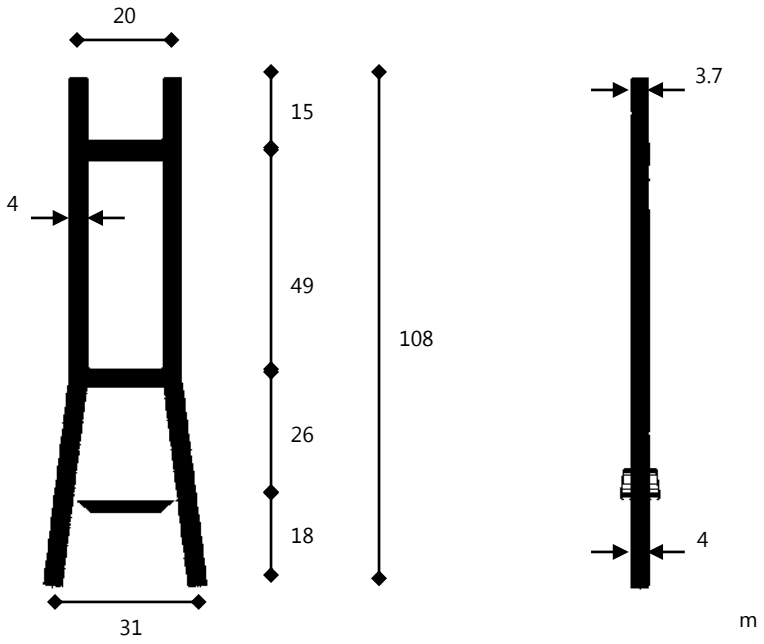


Figura 4.5.c *Dimensiones de pila del puente atirantado.*

La construcción del puente atirantado se analizó en 6 etapas, la sexta siendo el puente terminado. A continuación se describe cada una de las etapas y además se presentan los resultados obtenidos al someter a cada una de ellas a un análisis modal.

En la primera etapa ya se encuentra construida la torre, están colocadas las 2 dovelas de arranque además de otras 14 dovelas hacia ambos lados de la torre, el claro que cubre el tablero es de 61.2 m a cada lado. Ocho pares de tirantes sostienen al tablero en esta etapa.

- Etapa 1 (Puente E – E1)

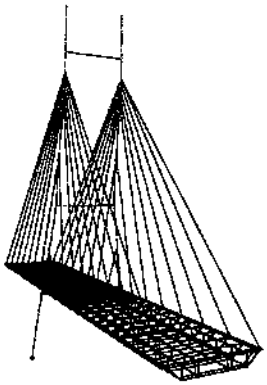


Figura 4.5.d *Modo 4: T – 1.40 s.*

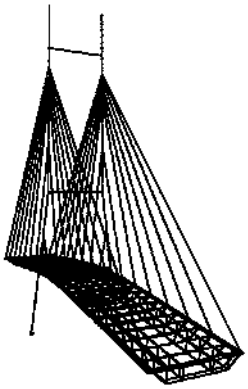


Figura 4.5.e *Modo 8: V – 0.64 s.*

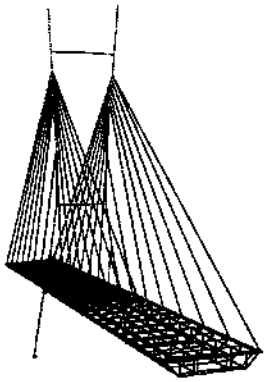


Figura 4.5.f *Modo 11: Tor. – 0.40 s.*

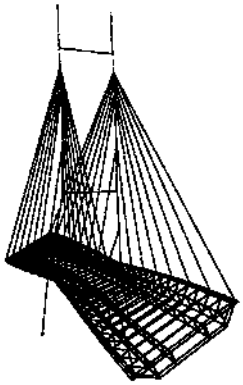


Figura 4.5.g *Modo 12: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.37 s.*

La segunda etapa se llega a una longitud de tablero de 102 m en el lado donde se tiene el claro mayor mientras que en el lado del claro de compensación se alcanza a llegar al contrapeso, en dicho lado se tiene una longitud de tablero de 73.46 m. Se tienen13 pares de tirantes a cada lado soportando el tablero.

- Etapa 2 (Puente E – E2)

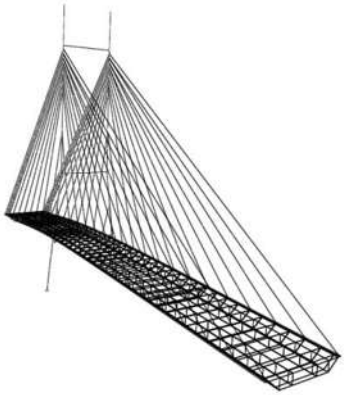


Figura 4.5.h *Modo 1: V – 1.63 s.*

Figura 4.5.i *Modo2: T – 1.48 s.*

Figura 4.5.j *Modo 11: Tor. – 0.38 s.*

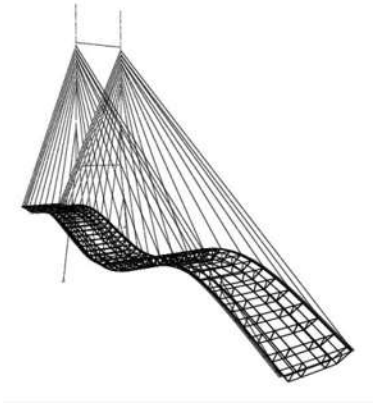


Figura 4.5.k *Modo 12: V – 0.35 s.*

Al continuar con la colocación de dovelas, la etapa 3 cuenta con una longitud de tablero de 142.8 m en el lado del claro principal y de 81.86 m en el lado del claro de compensación, además se han instalado un total de 18 pares de tirantes a cada lado de la torre.

- Etapa 3 (Puente E – E3)

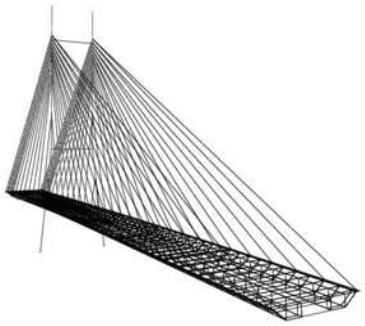


Figura 4.5.l *Modo 1: T – 2.20 s.*

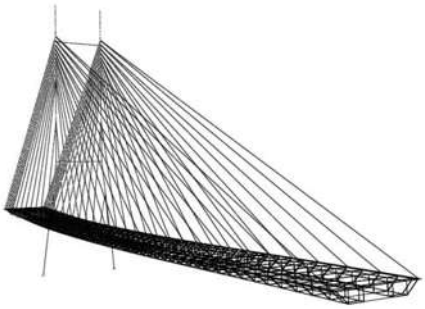


Figura 4.5.m *Modo 2: V – 1.65 s.*

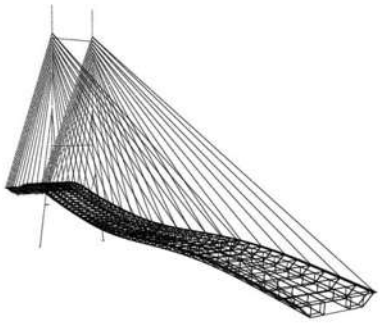


Figura 4.5.n *Modo 11: V – 0.44 s.*

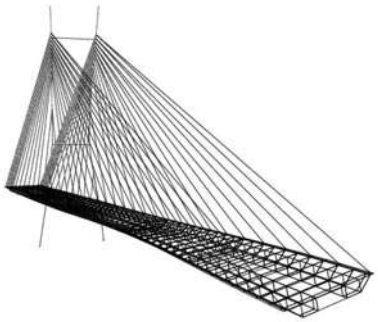


Figura 4.5.o *Modo 12: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.37 s.*

En la cuarta etapa se tiene una longitud de 183.60 m y 90.26 m en el lado del claro mayor y el del claro menor respectivamente. El total de tirantes soportando el tablero por cada lado de la torre es de 23.

- Etapa 4 (Puente E – E4)

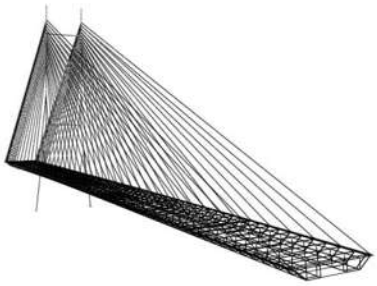


Figura 4.5.p *Modo 1: T – 3.25 s.*

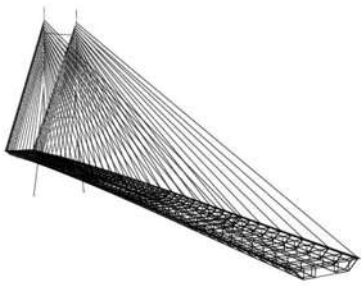


Figura 4.5.q *Modo 2: V – 1.85 s.*

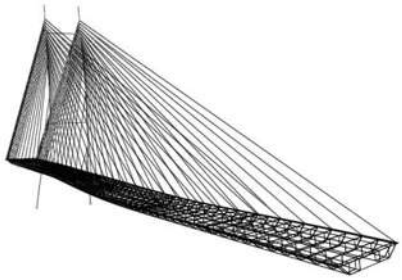


Figura 4.5.r *Modo 11: T – 0.49 s.*

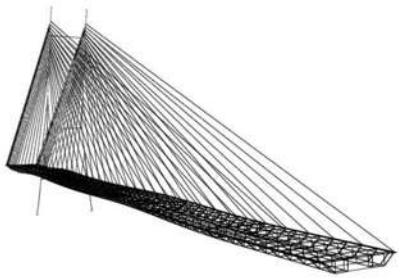


Figura 4.5.s *Modo 12: V – 0.47 s.*

En la quinta etapa solamente es necesario colocar la dovela de cierre para terminar el puente. Se tiene una longitud de tablero total de 216.24 m en el lado del claro mayor y de 98.74 m en el claro de compensación. Se tiene el número final de tirantes por torre que son 27 pares en el claro mayor y 28 en el otro claro, el cual contiene el contrapeso.

- Etapa 5 (Puente E – E5)

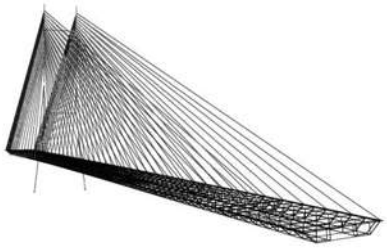


Figura 4.5.t *Modo 1: T – 4.24 s.*

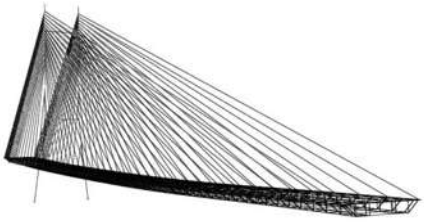


Figura 4.5.u *Modo 2: V – 2.03 s.*

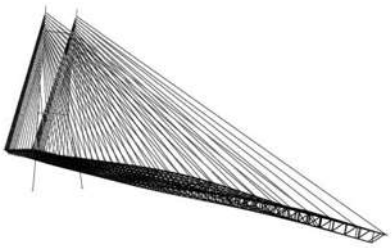


Figura 4.5.v *Modo 11: Tor. – 0.55 s.*

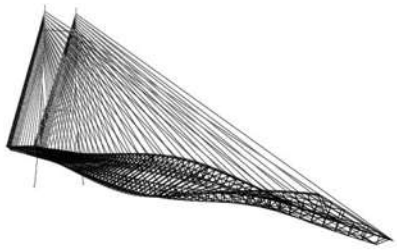


Figura 4.5.w *Modo 12: Tor. – 0.46 s.*

A la última etapa solamente se le agregó la dovela de cierre para tener terminado el tablero y por ende el puente.

- Puente Terminado (Puente E – T)

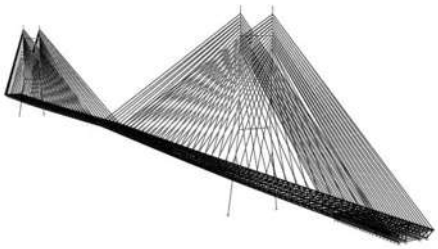


Figura 4.5.x *Modo 1: T – 4.36 s.*

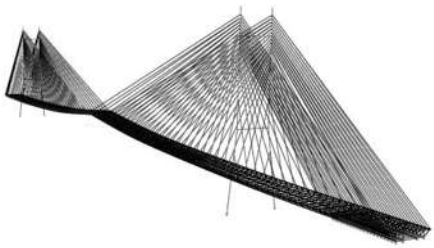


Figura 4.5.y *Modo 2: V – 2.10 s.*

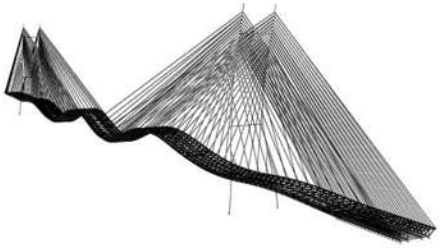


Figura 4.5.z *Modo 11: V – 0.81 s.*

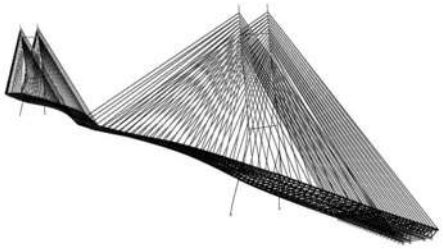


Figura 4.5.aa *Modo 12: T – 0.79 s.*

Después de realizar los mismos dos análisis desarrollados en los puentes anteriores, se obtuvieron las relaciones para determinar la influencia de la componente vertical en el puente.

Las placas analizadas del tablero se ubican en su centro transversal, tanto de la losa superior como inferior. Longitudinalmente se ubican al centro del claro de la primera etapa en los extremos del tablero de cada una de las etapas. Además se observó el comportamiento de todos los cables, de la base de la pila, así como el desplazamiento de los nodos del punto donde se une el último cable de cada etapa con el tablero.

A continuación se muestra una figura de cada etapa estudiada al igual que los resultados obtenidos en cada relación.

- Etapa 1 (Puente E – E1)

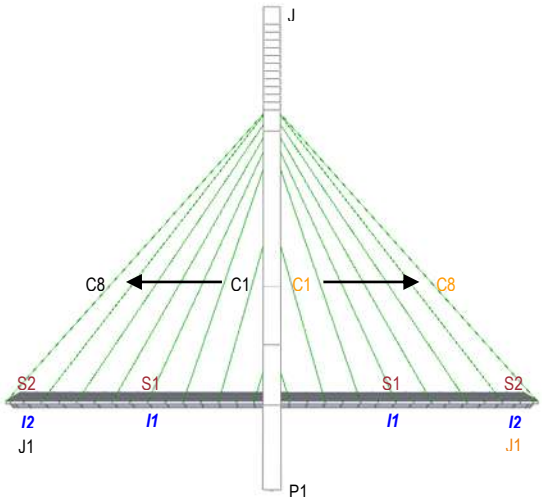


Figura 4.5.ab *Partes analizadas del Puente E, etapa 1.*

3C/2C

	S2	S1	S1	S2	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.9920	0.9984	1.0056	1.0031	1.0007	1.0017	1.0018	1.0004
Mmax	0.9610	0.9963	0.9855	0.9953	0.9952	0.9897	1.0169	0.9967

3C/M

	S2	S1	S1	S2	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.0025	0.1561	0.1795	0.0024	0.0045	0.0421	0.0304	0.0081
Mmax	0.1502	**1.6290**	**1.9000**	0.0840	0.6414	**1.2615**	**1.7123**	1.0417

2C/M

	S2	S1	S1	S2	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.0025	0.1564	0.1785	0.0024	0.0044	0.0420	0.0303	0.0081
Mmax	0.1563	**1.6350**	**1.9280**	0.0844	0.6445	**1.2746**	**1.6838**	1.0451

(3C-2C)/M

	S2	S1	S1	S2	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.0000	-0.0003	0.0010	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000
Mmax	-0.0061	-0.0060	-0.0280	-0.0004	-0.0031	-0.0131	0.0285	-0.0034

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S2	S1	S1	S2	I2	I1	I1	I2
Vmax	1.0000	0.9998	1.0008	1.0000	1.0000	1.0001	1.0001	1.0000
Mmax	0.9947	0.9977	0.9904	0.9996	0.9981	0.9943	1.0106	0.9983

Tabla 4.5.a *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 1.*

3C/2C

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Pmax	0.9894	0.9858	0.9820	0.9855	1.0428	1.0510	1.0401	0.9864

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pmax	0.9743	1.0108	1.0496	1.0340	0.9908	0.9932	0.9953	0.9968

3C/M

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Pmax	**1.2664**	**1.2568**	**1.1940**	**1.1175**	1.0998	1.0991	**1.1430**	**4.0041**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pmax	**3.9641**	**1.1301**	**1.0998**	**1.1007**	**1.1620**	**1.2663**	**1.3445**	**1.3595**

2C/M

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Pmax	**1.2799**	**1.2750**	**1.2158**	**1.1339**	1.0547	1.0457	1.0990	**4.0595**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pmax	**4.0687**	**1.1180**	1.0478	1.0646	**1.1727**	**1.2750**	**1.3508**	**1.3638**

(3C-2C)/M

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Pmax	-0.0135	-0.0181	-0.0218	-0.0164	0.0451	0.0533	0.0440	-0.0553

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pmax	-0.1046	0.0121	0.0520	0.0362	-0.0108	-0.0086	-0.0063	-0.0044

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
Pmax	0.9941	0.9920	0.9901	0.9923	1.0220	1.0261	1.0210	0.9891

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Pmax	0.9794	1.0057	1.0254	1.0175	0.9950	0.9962	0.9973	0.9981

Tabla 4.5.b *Resultados de cables del Puente E, etapa 1.*

	3C/2C			3C/M		
	J	J1	J1	J	J1	J1
dx	0.9988	x	x	DIV/0	x	x
dz	x	0.9983	0.9932	x	**6.1653**	**4.7191**

	2C/M			(3C-2C)/M		
	J	J1	J1	J	J1	J1
dx	DIV/0	x	x	DIV/0	x	x
dz	x	**6.1756**	**4.7513**	x	-0.0103	-0.0321

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	J	J1	J1
dx	0.9988	x	x
dz	x	0.9986	0.9944

Tabla 4.5.c *Resultados de desplazamientos en tablero del Puente E, etapa 1.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
			P1		
F1	0.9965	DIV/0	DIV/0	DIV/0	0.0000
F2	1.1309	**3.4259**	3.0293	0.3966	0.9965
F3	1.2177	**2.0414**	1.6764	0.3650	1.0984
M1	0.9980	69.3548	**69.4907**	-0.1359	1.1364
M2	0.9934	DIV/0	DIV/0	DIV/0	0.9981
M3	0.9919	DIV/0	DIV/0	DIV/0	0.9934

Tabla 4.5.d *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 1.*

- Etapa 2 (Puente E – E2)

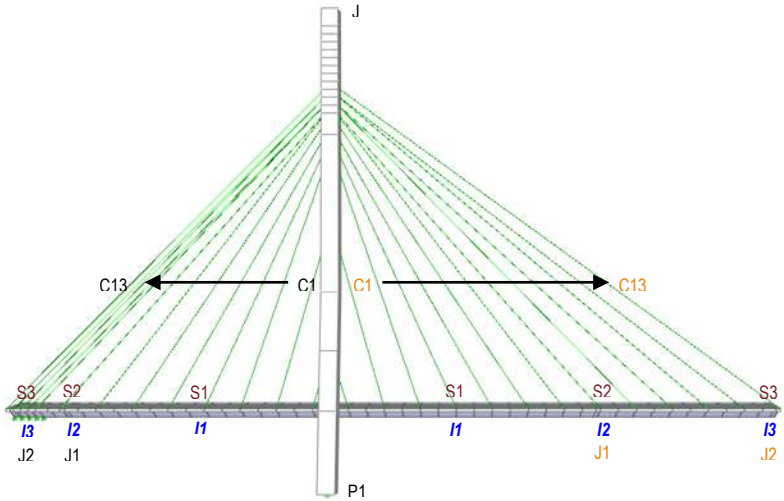


Figura 4.5.ac *Partes analizadas del Puente E, etapa 2.*

3C/2C

	S3	S2	S1	S1	S2	S3	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	1.0000	1.0001	1.0026	0.9957	1.0084	0.9816	1.0026	1.0091	1.0092	0.9981	0.9958	1.0039
Mmax	0.9958	1.0505	1.0092	1.0195	1.0289	0.9613	1.0227	1.0503	1.0209	1.0344	0.9420	0.9955

3C/M

	S3	S2	S1	S1	S2	S3	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.0487	0.0710	0.1613	0.1954	0.0071	0.0030	0.0373	0.0612	0.1793	0.1884	0.0211	0.0173
Mmax	**2.7344**	**7.5108**	**3.3691**	**2.0019**	**1.4411**	0.0401	**6.5945**	**5.1542**	**2.3028**	**1.8052**	**1.3838**	**1.4534**

2C/M

	S3	S2	S1	S1	S2	S3	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.0487	0.0710	0.1608	0.1962	0.0070	0.0030	0.0372	0.0607	0.1777	0.1887	0.0212	0.0172
Mmax	**2.7460**	**7.1495**	**3.3383**	**1.9636**	**1.4007**	0.0417	**6.4482**	**4.9075**	**2.2556**	**1.7452**	**1.4690**	**1.4600**

(3C-2C)/M

	S3	S2	S1	S1	S2	S3	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.0000	0.0000	0.0004	-0.000	0.000	-0.000	0.0001	0.0006	0.0016	-0.000	-0.000	0.0001
Mmax	-0.011	0.3613	0.0309	0.0383	0.0404	-0.001	0.1463	0.2467	0.0472	0.0600	-0.085	-0.006

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S3	S2	S1	S1	S2	S3	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	1.0000	1.0000	1.0004	0.9993	1.0001	0.9999	1.0001	1.0005	1.0014	0.9997	0.9999	1.0001

Mmax	0.9969	1.0443	1.0071	1.0129	1.0168	0.9984	1.0196	1.0418	1.0145	1.0219	0.9655	0.9973

Tabla 4.5.e *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 2.*

3C/2C

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	0.9746	0.9745	0.9745	0.9744	0.9745	0.9764	0.9831	0.9921	1.0028	1.0494

	C3	C2	C1
Pmax	1.0872	1.0272	1.0388

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pmax	**1.1190**	1.0065	1.0231	0.9808	0.9787	0.9787	0.9803	0.9831	0.9860	0.9893

	C11	C12	C13
Pmax	0.9920	0.9948	0.9968

3C/M

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	**1.8213**	**1.8063**	**1.8070**	**1.7885**	**1.7878**	**1.7523**	**1.6729**	**1.5513**	**1.4141**	**1.3297**

	C3	C2	C1
Pmax	**1.2627**	**1.2733**	**1.9142**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pmax	**1.8971**	**1.2616**	**1.2060**	**1.2425**	**1.3364**	**1.4257**	**1.5202**	**1.6352**	**1.7027**	**1.7802**

	C11	C12	C13
Pmax	**1.8141**	**1.8485**	**1.8442**

2C/M

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	**1.8688**	**1.8535**	**1.8543**	**1.8355**	**1.8347**	**1.7945**	**1.7018**	**1.5636**	**1.4102**	**1.2671**

	C3	C2	C1
Pmax	**1.1615**	**1.2395**	**1.8427**

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10

Pmax	**1.6954**	**1.2535**	**1.1788**	**1.2668**	**1.3655**	**1.4567**	**1.5508**	**1.6634**	**1.7269**	**1.7995**

	C11	C12	C13
Pmax	**1.8286**	**1.8582**	**1.8500**

(3C-2C)/M

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	-0.0475	-0.0472	-0.0473	-0.0470	-0.0469	-0.0423	-0.0288	-0.0123	0.0039	0.0626

	C3	C2	C1
Pmax	0.1012	0.0338	0.0716

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pmax	0.2017	0.0081	0.0272	-0.0243	-0.0291	-0.0310	-0.0305	-0.0281	-0.0242	-0.0193

	C11	C12	C13
Pmax	-0.0146	-0.0097	-0.0059

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	0.9834	0.9835	0.9834	0.9834	0.9835	0.9849	0.9893	0.9952	1.0016	1.0276

	C3	C2	C1
Pmax	1.0468	1.0151	1.0252

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pmax	1.0748	1.0036	1.0125	0.9893	0.9877	0.9874	0.9880	0.9894	0.9911	0.9931

	C11	C12	C13
Pmax	0.9948	0.9966	0.9979

Tabla 4.5.f *Resultados de cables del Puente E, etapa 2.*

	3C/2C					3C/M				
	J	J2	J1	J1	J2	J	J2	J1	J1	J2
dx	0.9808	x	x	x	x	**3.5231**	x	x	x	x

dz	x	0.9804	1.0057	0.9732	0.9778	x	**1.8036**	**6.2032**	**2.8869**	**2.4011**

	2C/M					(3C-2C)/M				
	J	J2	J1	J1	J2	J	J2	J1	J1	J2
dx	**3.5922**	x	x	x	x	-0.0691	x	x	x	x
dz	x	**1.8396**	**6.1682**	**2.9664**	**2.4556**	x	-0.0360	0.0350	-0.0795	-0.0545

	[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]				
	J	J2	J1	J1	J2
dx	0.9850	x	x	x	x
dz	x	0.9873	1.0049	0.9800	0.9842

Tabla 4.5.g *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 2.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
	P1				
F1	1.0119	**28.9288**	28.5898	0.3390	1.0115
F2	1.0460	**3.6451**	3.4849	0.1603	1.0357
F3	1.0587	**1.7116**	1.6166	0.0950	1.0363
M1	1.0004	**48.0522**	48.0326	0.0196	1.0004
M2	1.0145	**8.2169**	8.0998	0.1170	1.0129
M3	1.0136	**12.7174**	12.5465	0.1709	1.0126

Tabla 4.5.h *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 2.*

- Etapa 3 (Puente E – E3)

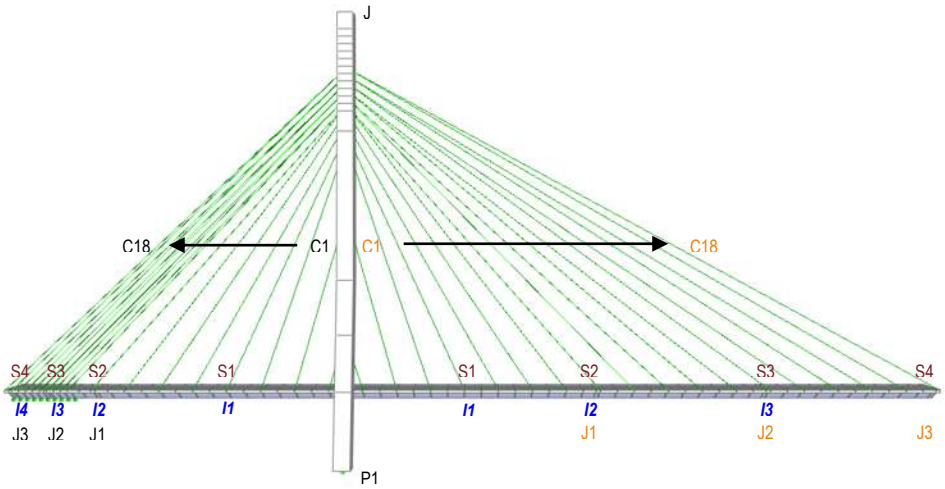


Figura 4.5.ad *Partes analizadas del Puente E, etapa 3.*

3C/2C

	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	I4	I3
Vmax	0.9998	0.9996	1.0003	0.9985	1.0060	1.0237	1.0032	1.1156	0.9953	0.0998
Mmax	1.0577	1.1068	1.0916	0.9535	1.0215	0.9765	1.0045	1.0303	0.9975	1.0739

	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.1008	0.0997	0.0996	1.0118	1.0006
Mmax	1.0127	1.0332	1.0156	0.9628	1.0018

3C/M

	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	I4	I3
Vmax	0.0139	0.0158	0.0768	0.3471	0.5251	0.0214	0.0244	0.0149	0.0130	0.0302
Mmax	0.5899	**1.1676**	**6.7240**	**1.3096**	**2.7704**	**3.2233**	**1.2816**	0.8119	**1.3359**	**3.0968**

	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.0561	0.2230	0.2529	0.0224	0.0130
Mmax	**2.5429**	**1.3836**	**1.9684**	**1.3400**	**1.8224**

2C/M

	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	I4	I3
Vmax	0.0139	0.0158	0.0768	0.3476	0.5220	0.0209	0.0243	0.0134	0.0130	0.3021

Mmax	0.5577	1.0550	**6.1596**	**1.3734**	**2.7120**	**3.3008**	**1.2759**	0.7881	**1.3392**	**2.8837**

	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.5571	**2.2361**	**2.5397**	0.0222	0.0130
Mmax	**2.5109**	**1.3390**	**1.9382**	**1.3918**	**1.8192**

(3C-2C)/M

	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	I4	I3
Vmax	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0005	0.0031	0.0005	0.0001	0.0015	-0.0001	-0.2719
Mmax	0.0322	0.1126	0.5644	-0.0638	0.0583	-0.0775	0.0057	0.0238	-0.0033	0.2131

	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	-0.5010	-2.0131	-2.2867	0.0003	0.0000
Mmax	0.0320	0.0445	0.0301	-0.0518	0.0032

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	I4	I3
Vmax	1.0000	1.0000	1.0000	0.9996	1.0021	1.0005	1.0001	1.0015	0.9999	0.7912
Mmax	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998	1.0009	1.0004	1.0001	1.0011	0.9999	0.6916

	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.6783	0.3779	0.3540	1.0003	1.0000
Mmax	0.6504	0.5652	0.5318	1.0002	1.0000

Tabla 4.5.i *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 3*

3C/2C

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	0.9911	0.9914	0.9978	0.9977	0.9965	0.9965	0.9975	0.9975	0.9985	0.9985

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0002	1.0040	1.0112	1.0352	1.0669	1.0889	1.0421	1.0814	1.0562	0.9936

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	1.0109	0.9865	0.9842	0.9832	0.9831	0.9834	0.9838	0.9843	0.9843	0.9844

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Pmax	0.9839	0.9953	1.0324	1.0299	1.0271	1.0249

3C/M

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	**1.3131**	**1.3144**	**1.3081**	**1.3089**	**1.3223**	**1.3242**	**1.3445**	**1.3461**	**1.3654**	**1.3654**

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	**1.3696**	**1.3099**	**1.2481**	**1.2492**	**1.2431**	**1.2159**	**1.2734**	**1.8352**	**1.8941**	**1.2057**

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	**1.1668**	**1.2175**	**1.2585**	**1.3088**	**1.3575**	**1.4147**	**1.4363**	**1.4623**	**1.4587**	**1.4562**

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Pmax	**1.4293**	**1.4235**	**1.4604**	**1.5019**	**1.5225**	**1.5412**

2C/M

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	**1.3249**	**1.3257**	**1.3109**	**1.3120**	**1.3270**	**1.3288**	**1.3479**	**1.3494**	**1.3675**	**1.3674**

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	**1.3694**	**1.3047**	**1.2342**	**1.2067**	**1.1652**	**1.1166**	**1.2220**	**1.6970**	**1.7933**	**1.2135**

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	**1.1543**	**1.2342**	**1.2787**	**1.3311**	**1.3808**	**1.4386**	**1.4599**	**1.4855**	**1.4819**	**1.4793**

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Pmax	**1.4527**	**1.4302**	**1.4146**	**1.4584**	**1.4823**	**1.5037**

(3C-2C)/M

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	-0.0118	-0.0114	-0.0029	-0.0031	-0.0046	-0.0046	-0.0034	-0.0033	-0.0021	-0.0020

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	0.0003	0.0052	0.0139	0.0425	0.0779	0.0993	0.0514	0.1382	0.1008	-0.0078

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	0.0125	-0.0167	-0.0202	-0.0223	-0.0233	-0.0239	-0.0236	-0.0233	-0.0232	-0.0231

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Pmax	-0.0235	-0.0067	0.0459	0.0436	0.0402	0.0375

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	0.9949	0.9951	0.9988	0.9987	0.9980	0.9980	0.9986	0.9986	0.9991	0.9992

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0001	1.0023	1.0062	1.0193	1.0360	1.0469	1.0231	1.0512	1.0361	0.9965

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	1.0058	0.9925	0.9911	0.9904	0.9902	0.9902	0.9904	0.9906	0.9906	0.9907

	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Pmax	0.9904	0.9972	1.0190	1.0177	1.0162	1.0150

Tabla 4.5.j *Resultados de cables del Puente E, etapa 3.*

3C/2C

	J	J3	J2	J1	J1	J2	J3
dx	0.9743	x	x	x	x	x	x
dz	x	0.9997	1.0007	1.0806	1.0373	1.0437	1.0290

3C/M

	J	J3	J2	J1	J1	J2	J3
dx	**2.2175**	x	x	x	x	x	x
dz	x	**1.3274**	**1.3575**	**3.8054**	**2.4974**	**2.2972**	**2.0462**

2C/M

	J	J3	J2	J1	J1	J2	J3
dx	**2.2761**	x	x	x	x	x	x
dz	x	**1.3278**	**1.3565**	**3.5218**	**2.4077**	**2.2010**	**1.9886**

(3C-2C)/M

	J	J3	J2	J1	J1	J2	J3
dx	-0.0585	x	x	x	x	x	x
dz	x	-0.0004	0.0010	0.2837	0.0897	0.0962	0.0576

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	J	J3	J2	J1	J1	J2	J3
dx	0.9821	x	x	x	x	x	x
dz	x	0.9998	1.0004	1.0627	1.0263	1.0300	1.0193

Tabla 4.5.k *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 3.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
			P1		
F1	0.9842	31.8106	**32.3198**	-0.5092	0.9847
F2	0.9610	2.8260	**2.9406**	-0.1146	0.9709
F3	1.0623	**1.5611**	1.4696	0.0915	1.0371
M1	1.0000	**43.3152**	**43.3152**	0.0000	1.0000
M2	0.1043	6.9062	**66.1868**	-59.2806	0.1177
M3	0.9908	18.5858	**18.7577**	-0.1719	0.9913

Tabla 4.5.l *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 3.*

- Etapa 4 (Puente E – E4)

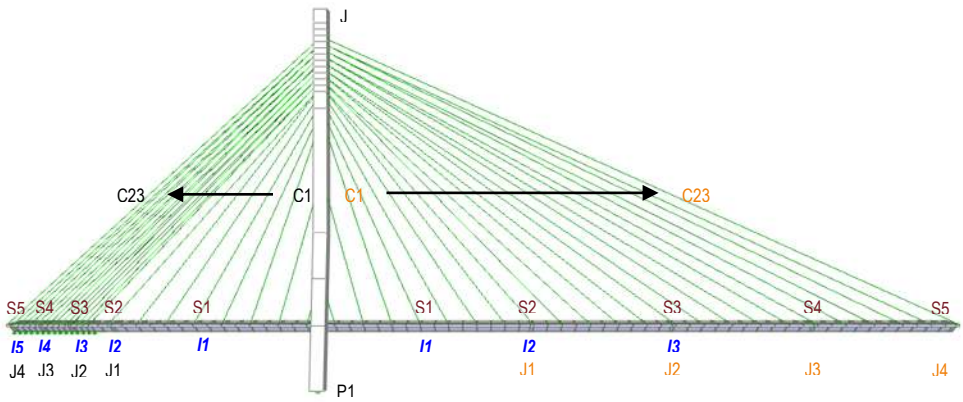


Figura 4.5.ae *Partes analizadas del Puente E, etapa 4.*

3C/2C

	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	S5
Vmax	0.9957	0.9977	0.9987	0.9966	1.0007	1.0000	1.0035	1.0083	0.9915	1.0560
Mmax	1.0532	1.0178	**1.1263**	1.0213	1.0341	1.0031	0.9735	1.0515	0.9105	1.0053

	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	1.0114	1.0016	1.0018	0.9974	0.9979	0.9983	1.0030	1.0332
Mmax	1.0356	1.0614	0.9821	**1.2098**	0.9861	1.0054	1.0202	0.9536

3C/M

	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	S5
Vmax	0.0087	0.0068	0.0123	0.0450	0.3808	0.6494	0.0148	0.0271	0.0638	0.0104
Mmax	0.3873	0.6246	1.0057	**4.0438**	**1.1277**	**2.3550**	**3.5869**	**3.1433**	**2.1728**	0.6615

	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.0129	0.0103	0.0230	0.0587	0.2273	0.2946	0.0214	0.0084
Mmax	1.0990	**1.6376**	**1.1885**	**1.2970**	**1.2320**	**1.9080**	**1.5933**	**1.5944**

2C/M

	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	S5
Vmax	0.0088	0.0069	0.0123	0.0451	0.3805	0.6494	0.0148	0.0269	0.0644	0.0099
Mmax	0.3677	0.6137	0.8930	**3.9595**	1.0904	**2.3477**	**3.6846**	**2.9894**	**2.3864**	0.6580

I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2	I3

Vmax	0.0128	0.0103	0.0230	0.0588	0.2278	0.2951	0.0213	0.0081
Mmax	1.0612	**1.5429**	**1.2102**	1.0721	**1.2493**	**1.8978**	**1.5617**	**1.6719**

(3C-2C)/M

	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	S5
Vmax	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0002	0.0003	0.0000	0.0001	0.0002	-0.0005	0.0006
Mmax	0.0195	0.0109	0.1128	0.0843	0.0372	0.0073	-0.0977	0.1539	-0.2136	0.0035

	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	0.0001	0.0000	0.0000	-0.0002	-0.0005	-0.0005	0.0001	0.0003
Mmax	0.0378	0.0947	-0.0217	0.2249	-0.0173	0.0102	0.0316	-0.0775

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4	S5
Vmax	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	1.0002	1.0000	1.0001	1.0002	0.9995	1.0005
Mmax	1.0143	1.0068	1.0596	1.0170	1.0178	1.0022	0.9791	1.0386	0.9369	1.0021

	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2	I3
Vmax	1.0001	1.0000	1.0000	0.9999	0.9996	0.9996	1.0001	1.0003
Mmax	1.0183	1.0373	0.9902	**1.1085**	0.9923	1.0035	1.0123	0.9710

Tabla 4.5.m *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 4.*

3C/2C

	C23	C22	C21	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14
Pmax	0.9852	0.9923	0.9922	0.9991	0.9989	1.0061	1.0059	0.9970	0.9957	0.9847

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	0.9832	0.9721	0.9706	0.9705	0.9705	0.9731	1.0025	1.0411	1.0431	1.0733

	C3	C2	C1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Pmax	1.0945	1.0806	1.0687	0.9888	0.9917	1.0014	0.9896	0.9901	0.9919	0.9946

	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Pmax	0.9981	1.0016	1.0056	1.0095	1.0135	1.0173	1.0212	1.0124	1.0011	0.9946

	C18	C19	C20	C21	C22	C23
Pmax	0.9897	0.9862	0.9905	0.9845	0.9656	0.9611

3C/M

	C23	C22	C21	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14
Pmax	**1.1610**	**1.1594**	**1.1595**	**1.1649**	**1.1648**	**1.1706**	**1.1703**	**1.1765**	**1.1761**	**1.1826**

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	**1.1820**	**1.1888**	**1.1878**	**1.2073**	**1.2073**	**1.2197**	**1.2094**	**1.2082**	**1.1988**	**1.2127**

	C3	C2	C1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Pmax	**1.2094**	**1.2513**	**1.7144**	**1.9787**	**1.2387**	**1.1345**	**1.1581**	**1.1990**	**1.2325**	**1.2678**

	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Pmax	**1.3189**	**1.3304**	**1.3542**	**1.3433**	**1.3429**	**1.3137**	**1.2980**	**1.2596**	**1.2373**	**1.2206**

	C18	C19	C20	C21	C22	C23
Pmax	**1.2057**	**1.1903**	**1.1838**	**1.1856**	**1.2014**	**1.2367**

2C/M

	C23	C22	C21	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14
Pmax	**1.1785**	**1.1684**	**1.1686**	**1.1660**	**1.1661**	**1.1634**	**1.1635**	**1.1801**	**1.1811**	**1.2011**

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	**1.2021**	**1.2229**	**1.2238**	**1.2441**	**1.2440**	**1.2534**	**1.2064**	**1.1605**	**1.1493**	**1.1300**

	C3	C2	C1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Pmax	**1.1050**	**1.1579**	**1.6042**	**2.0011**	**1.2491**	**1.1329**	**1.1703**	**1.2110**	**1.2425**	**1.2747**

	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Pmax	**1.3214**	**1.3283**	**1.3466**	**1.3307**	**1.3250**	**1.2913**	**1.2711**	**1.2443**	**1.2359**	**1.2272**

	C18	C19	C20	C21	C22	C23
Pmax	**1.2182**	**1.2070**	**1.1952**	**1.2043**	**1.2442**	**1.2867**

(3C-2C)/M

	C23	C22	C21	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14
Pmax	-0.0175	-0.0089	-0.0091	-0.0011	-0.0013	0.0071	0.0068	-0.0036	-0.0050	-0.0184

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	-0.0202	-0.0341	-0.0359	-0.0368	-0.0367	-0.0337	0.0030	0.0477	0.0495	0.0828

	C3	C2	C1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Pmax	0.1044	0.0934	0.1103	-0.0224	-0.0104	0.0016	-0.0122	-0.0120	-0.0100	-0.0069

	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Pmax	-0.0025	0.0022	0.0076	0.0126	0.0179	0.0224	0.0269	0.0154	0.0014	-0.0066

	C18	C19	C20	C21	C22	C23
Pmax	-0.0126	-0.0167	-0.0114	-0.0187	-0.0428	-0.0500

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C23	C22	C21	C20	C19	C18	C17	C16	C15	C14
Pmax	0.9920	0.9959	0.9958	0.9995	0.9994	1.0033	1.0032	0.9984	0.9977	0.9916

	C13	C12	C11	C10	C9	C8	C7	C6	C5	C4
Pmax	0.9908	0.9846	0.9838	0.9836	0.9837	0.9850	1.0014	1.0221	1.0230	1.0389

	C3	C2	C1	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Pmax	1.0496	1.0433	1.0423	0.9925	0.9954	1.0008	0.9944	0.9946	0.9955	0.9970

	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17
Pmax	0.9989	1.0009	1.0032	1.0054	1.0077	1.0098	1.0119	1.0068	1.0006	0.9970

	C18	C19	C20	C21	C22	C23
Pmax	0.9943	0.9924	0.9948	0.9915	0.9809	0.9781

Tabla 4.5.n *Resultados de cables del Puente E, etapa 4.*

3C/2C

	J	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	0.9747	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	0.9907	1.0020	0.9793	0.9316	0.9985	1.0126	0.9943	0.9910

3C/M

	J	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	**1.9986**	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	**1.1710**	**1.1761**	**1.1927**	**2.1068**	**2.2412**	**1.9354**	**1.5533**	**1.4931**

2C/M

	J	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	**2.0504**	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	**1.1820**	**1.1737**	**1.2179**	**2.2615**	**2.2445**	**1.9112**	**1.5622**	**1.5067**

(3C-2C)/M

	J	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	-0.0518	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	-0.0110	0.0024	-0.0252	-0.1547	-0.0033	0.0241	-0.0089	-0.0136

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	J	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	0.9830	x	x	x	x	x	x	x	x
dz	x	0.9950	1.0011	0.9886	0.9526	0.9990	1.0083	0.9965	0.9946

Tabla 4.5.o *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 4.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
			P1		
F1	0.9905	41.8849	**42.2867**	-0.4017	0.9907
F2	1.0253	**2.5552**	2.4921	0.0631	1.0181
F3	1.1086	**1.5278**	1.3781	0.1497	1.0629
M1	0.9988	52.4950	**52.5607**	-0.0657	0.9988
M2	1.0112	**8.4061**	8.3134	0.0928	1.0100
M3	1.0108	**25.4572**	25.1853	0.2719	1.0104

Tabla 4.5.p *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 4.*

- Etapa 5 (Puente E – E5)

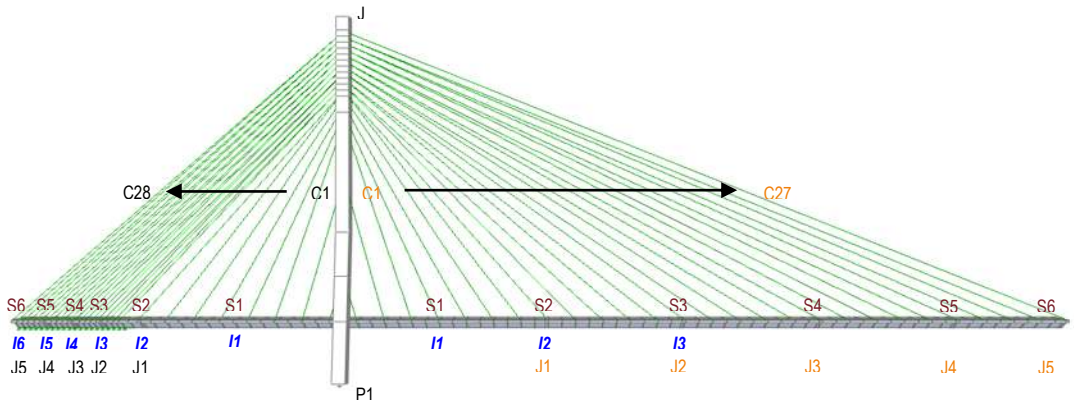


Figura 4.5.af *Partes analizadas del Puente E, etapa 5.*

3C/2C

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	0.9996	0.9990	1.0034	1.0031	0.9972	1.0007	0.9972	0.9996	0.9990	0.9941
Mmax	1.0254	1.0273	1.0514	**1.2340**	**1.1598**	1.0289	0.9919	0.9989	1.0227	1.0750

	S5	S6	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.9927	0.9613	0.9921	0.9928	1.0054	1.0040	0.9983	1.0050	1.0029	0.9909
Mmax	0.9774	1.0183	1.0272	1.0264	1.0398	1.0699	**1.5981**	1.0192	0.9948	1.0048

I3

Vmax	0.9888
Mmax	1.0169

3C/M

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	0.0160	0.0024	0.0049	0.0078	0.0329	0.8062	0.4348	0.0108	0.0164	0.0476
Mmax	0.4054	0.6562	0.6433	0.3456	**4.4352**	0.9982	**2.1027**	**3.7119**	**2.9573**	**3.1857**

	S5	S6	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.0539	0.0091	0.0159	0.0069	0.0085	0.0157	0.0437	0.1911	0.2325	0.0169
Mmax	**2.0124**	0.5713	**1.8383**	**1.8245**	**1.3923**	0.5198	**1.3720**	**1.1947**	**1.6453**	**1.5142**

	I3
Vmax	0.0064
Mmax	**1.6468**

2C/M

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	0.0161	0.0024	0.0049	0.0078	0.0330	0.8056	0.4361	0.0108	0.0164	0.0478
Mmax	0.3954	0.6387	0.6118	0.2801	**3.8242**	0.9701	**2.1200**	**3.7161**	**2.8917**	**2.9634**

	S5	S6	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.0543	0.0095	0.0160	0.0069	0.0084	0.0156	0.0438	0.1902	0.2319	0.0171
Mmax	**2.0591**	0.5610	**1.7896**	**1.7777**	**1.3390**	0.4858	0.8585	**1.1722**	**1.6540**	**1.5070**

	I3
Vmax	0.0065
Mmax	**1.6195**

(3C-2C)/M

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001	0.0005	-0.0012	0.0000	0.0000	-0.0003
Mmax	0.0100	0.0174	0.0315	0.0655	0.6109	0.0281	-0.0173	-0.0042	0.0656	0.2224

	S5	S6	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2
Vmax	-0.0004	-0.0004	-0.0001	-0.0001	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0010	0.0007	-0.0002

Mmax	-0.0466	0.0103	0.0487	0.0469	0.0533	0.0340	0.5135	0.0225	-0.0086	0.0073

	I3
Vmax	-0.0001
Mmax	0.0274

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	1.0003	0.9992	1.0000	1.0000	0.9997
Mmax	1.0072	1.0106	1.0195	1.0512	**1.1266**	1.0142	0.9945	0.9991	1.0169	1.0561

	S5	S6	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1	I2
Vmax	0.9996	0.9996	0.9999	1.0000	1.0000	1.0001	0.9999	1.0008	1.0006	0.9998
Mmax	0.9848	1.0066	1.0175	1.0169	1.0228	1.0229	**1.2763**	1.0104	0.9967	1.0029

	I3
Vmax	0.9999
Mmax	1.0105

Tabla 4.5.q *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 5.*

3C/2C

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	1.0289	1.0293	1.0299	1.0299	1.0298	1.0299	1.0195	1.0195	1.0101	1.0100

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	1.0019	1.0020	1.0005	1.0008	1.0051	1.0052	1.0131	1.0131	1.0179	1.0182

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0252	1.0226	1.0169	1.0402	1.0762	1.0973	1.0495	1.0337	1.0011	0.9957

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	1.0097	0.9894	0.9870	0.9856	0.9849	0.9848	0.9847	0.9848	0.9844	0.9842

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	0.9833	1.0154	1.0313	1.0180	1.0176	1.0135	1.0202	1.0105	1.0076	1.0271

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	1.0362	1.0370	1.0443	1.0451	1.0406

3C/M

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	**1.1587**	**1.1615**	**1.1565**	**1.1574**	**1.1500**	**1.1508**	**1.1392**	**1.1398**	**1.1346**	**1.1351**

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	**1.1314**	**1.1320**	**1.1358**	**1.1366**	**1.1465**	**1.1468**	**1.1731**	**1.1735**	**1.2003**	**1.2007**

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	**1.2223**	**1.1840**	**1.1529**	**1.1642**	**1.1834**	**1.1888**	**1.2344**	**1.6328**	**1.8325**	**1.2383**

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	**1.1465**	**1.1597**	**1.1929**	**1.2159**	**1.2385**	**1.2737**	**1.2707**	**1.2774**	**1.2515**	**1.2348**

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	**1.1929**	**1.2037**	**1.2038**	**1.2057**	**1.1933**	**1.1836**	**1.1635**	**1.1477**	**1.1303**	**1.1317**

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	**1.1398**	**1.1407**	**1.1424**	**1.1492**	**1.1573**

2C/M

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	**1.1262**	**1.1285**	**1.1230**	**1.1237**	**1.1167**	**1.1174**	**1.1174**	**1.1180**	**1.1232**	**1.1239**

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	**1.1292**	**1.1298**	**1.1352**	**1.1356**	**1.1407**	**1.1408**	**1.1580**	**1.1584**	**1.1792**	**1.1792**

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	**1.1923**	**1.1579**	**1.1338**	**1.1192**	**1.0996**	**1.0834**	**1.1761**	**1.5796**	**1.8305**	**1.2437**

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	**1.1354**	**1.1721**	**1.2086**	**1.2337**	**1.2575**	**1.2934**	**1.2904**	**1.2971**	**1.2713**	**1.2546**

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	**1.2132**	**1.1854**	**1.1672**	**1.1844**	**1.1727**	**1.1679**	**1.1405**	**1.1357**	**1.1303**	**1.1018**

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	**1.1000**	**1.1000**	1.0940	1.0996	**1.1122**

(3C-2C)/M

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	0.0325	0.0330	0.0335	0.0336	0.0333	0.0334	0.0218	0.0218	0.0114	0.0112

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	0.0021	0.0022	0.0006	0.0009	0.0058	0.0059	0.0152	0.0151	0.0212	0.0215

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	0.0300	0.0261	0.0191	0.0450	0.0838	0.1054	0.0583	0.0532	0.0020	-0.0054

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	0.0110	-0.0124	-0.0157	-0.0178	-0.0190	-0.0197	-0.0198	-0.0197	-0.0198	-0.0198

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	-0.0203	0.0183	0.0365	0.0213	0.0206	0.0158	0.0230	0.0120	0.0085	0.0299

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	0.0398	0.0407	0.0484	0.0496	0.0451

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	1.0153	1.0155	1.0158	1.0158	1.0157	1.0158	1.0103	1.0103	1.0054	1.0053

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	1.0010	1.0011	1.0003	1.0004	1.0027	1.0028	1.0070	1.0070	1.0097	1.0099

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0137	1.0121	1.0090	1.0212	1.0399	1.0506	1.0268	1.0206	1.0007	0.9976

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12

Pmax	1.0052	0.9943	0.9929	0.9920	0.9916	0.9914	0.9914	0.9914	0.9913	0.9912

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	0.9908	1.0084	1.0169	1.0097	1.0095	1.0073	1.0107	1.0056	1.0040	1.0142

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	1.0190	1.0194	1.0231	1.0236	1.0214

Tabla 4.5.r *Resultados de cables del Puente E, etapa 5.*

3C/2C

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	1.0654	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	1.0269	1.0254	1.0109	1.0054	1.0733	1.0700	1.0621	1.0857	**1.1179**

	J5
dx	x
dy	**1.1530**

3C/M

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	**1.6365**	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	**1.1698**	**1.1541**	**1.1482**	**1.1689**	**2.1518**	**2.3052**	**1.6917**	**1.5493**	**1.4322**

	J5
dx	x
dz	**1.4932**

2C/M

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	**1.5361**	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	**1.1391**	**1.1254**	**1.1358**	**1.1626**	**2.0048**	**2.1543**	**1.5929**	**1.4269**	**1.2811**

	J5
dx	x
dz	**1.2950**

(3C-2C)/M

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	0.1004	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	0.0306	0.0286	0.0124	0.0063	0.1470	0.1508	0.0988	0.1224	0.1511

	J5
dx	x
dz	0.1982

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	1.0396	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dz	x	1.0143	1.0135	1.0058	1.0029	1.0489	1.0478	1.0381	1.0504	1.0662

	J5
dx	x
dz	1.0863

Tabla 4.5.s *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 5.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
			P1		
F1	1.0386	1.0386	**92.7850**	3.5778	1.0381
F2	1.0057	1.0057	**2.1823**	0.0124	1.0039
F3	1.1073	1.1073	**1.3593**	0.1459	1.0618
M1	0.9974	0.9974	**44.4292**	-0.1146	0.9975
M2	0.9909	0.9909	**16.9623**	-0.1551	0.9914
M3	1.0099	1.0099	**1195.4545**	11.8182	1.0099

Tabla 4.5.t *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 5.*

- Puente Terminado (Puente E – T)

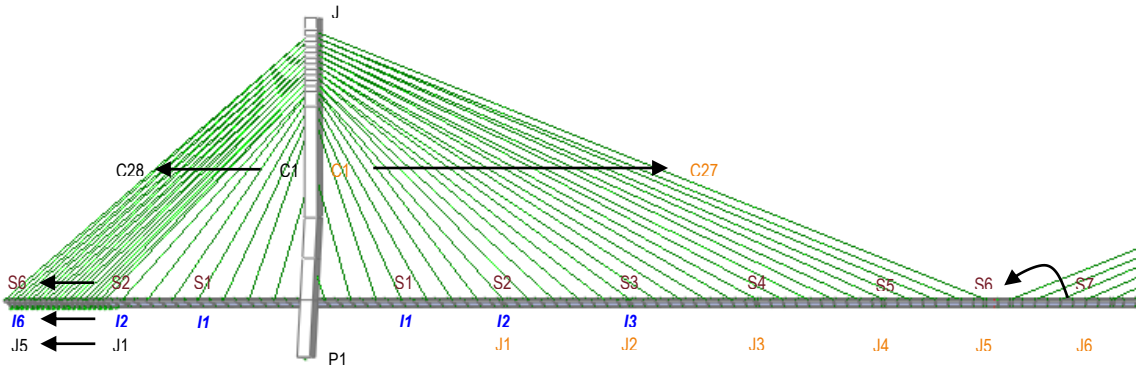


Figura 4.5.ag *Partes analizadas del Puente E terminado.*

3C/2C

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	1.0015	1.0005	1.0016	1.0030	0.9980	0.9987	0.9993	0.9986	0.9970	0.9896
Mmax	1.0240	1.0263	1.0530	1.2736	1.0509	1.0399	0.9947	1.0053	1.0212	1.0520

	S5	S6	S7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1
Vmax	0.9904	0.9844	0.9874	0.9888	0.9896	0.9966	1.0032	0.9988	0.9966	1.0022
Mmax	1.0089	1.0051	1.0174	1.0273	1.0262	1.0265	**1.1125**	**1.6110**	1.0183	0.9961

	I2	I3
Vmax	0.9897	0.9895
Mmax	1.0076	0.9990

3C/M

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	1.0015	1.0005	1.0016	1.0030	0.9980	0.9987	0.9993	0.9986	0.9970	0.9896
Mmax	1.0240	1.0263	1.0530	**1.2736**	1.0509	1.0399	0.9947	1.0053	1.0212	1.0520

	S5	S6	S7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1
Vmax	0.9904	0.9844	0.9874	0.9888	0.9896	0.9966	1.0032	0.9988	0.9966	1.0022
Mmax	1.0089	1.0051	1.0174	1.0273	1.0262	1.0265	**1.1125**	**1.6110**	1.0183	0.9961

	I2	I3
Vmax	0.9897	0.9895
Mmax	1.0076	0.9990

2C/M

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	0.0151	0.0024	0.0051	0.0080	0.0321	0.2477	0.4148	0.0102	0.0162	0.0484
Mmax	0.3854	0.6286	0.6191	0.3808	**3.5121**	0.9309	**2.0835**	**3.4299**	**3.2420**	**2.7872**

	S5	S6	S7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1
Vmax	0.0582	0.0251	0.0102	0.0172	0.0072	0.0081	0.0152	0.0426	0.1825	0.2283
Mmax	**2.6300**	**1.1592**	**2.0190**	**1.8283**	**1.7874**	**1.3442**	0.5071	0.8835	**1.1480**	**1.6286**

	I2	I3
Vmax	0.0177	0.0066
Mmax	**1.5381**	**1.5665**

(3C-2C)/M

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0003	-0.0003	0.0000	0.0000	-0.0005
Mmax	0.0092	0.0166	0.0328	0.1042	0.1788	0.0371	-0.0110	0.0181	0.0688	0.1449

	S5	S6	S7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1
Vmax	-0.0006	-0.0004	-0.0001	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0006	0.0005
Mmax	0.0233	0.0060	0.0350	0.0500	0.0468	0.0356	0.0571	0.5399	0.0211	-0.0064

	I2	I3
Vmax	-0.0002	-0.0001
Mmax	0.0117	-0.0016

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	S6	S5	S4	S3	S2	S1	S1	S2	S3	S4
Vmax	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9997	0.9998	1.0000	1.0000	0.9995
Mmax	1.0067	1.0102	1.0203	1.0755	1.0396	1.0192	0.9964	1.0041	1.0162	1.0383

	S5	S6	S7	I6	I5	I4	I3	I2	I1	I1
Vmax	0.9995	0.9996	0.9999	0.9998	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000	0.9995	1.0004
Mmax	1.0064	1.0028	1.0116	1.0177	1.0168	1.0152	1.0379	**1.2866**	1.0098	0.9976

	I2	I3
Vmax	0.9998	0.9999
Mmax	1.0046	0.9994

Tabla 4.5.s *Resultados de elementos en tablero del Puente E terminado.*

3C/2C

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	1.0183	1.0188	1.0211	1.0213	1.0233	1.0235	1.0235	1.0237	1.0142	1.0144

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	1.0045	1.0047	0.9943	0.9944	1.0072	1.0078	1.0263	1.0273	1.0364	1.0366

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0353	1.0283	1.0181	1.0469	1.0717	1.0933	1.0475	1.0302	0.9956	0.9938

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	1.0100	0.9903	0.9887	0.9883	0.9886	0.9888	0.9897	0.9903	0.9909	0.9910

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	0.9909	0.9900	0.9883	0.9866	0.9859	0.9789	0.9719	0.9638	0.9557	0.9472

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	0.9656	0.9999	1.0506	1.0821	1.0708

3C/M

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	1.0183	1.0188	1.0211	1.0213	1.0233	1.0235	1.0235	1.0237	1.0142	1.0144

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	1.0045	1.0047	0.9943	0.9944	1.0072	1.0078	1.0263	1.0273	1.0364	1.0366

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0353	1.0283	1.0181	1.0469	1.0717	1.0933	1.0475	1.0302	0.9956	0.9938

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	1.0100	0.9903	0.9887	0.9883	0.9886	0.9888	0.9897	0.9903	0.9909	0.9910

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	0.9909	0.9900	0.9883	0.9866	0.9859	0.9789	0.9719	0.9638	0.9557	0.9472

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	0.9656	0.9999	1.0506	1.0821	1.0708

2C/M

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	**1.1657**	**1.1683**	**1.1596**	**1.1604**	**1.1494**	**1.1500**	**1.1365**	**1.1369**	**1.1412**	**1.1415**

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	**1.1459**	**1.1461**	**1.1507**	**1.1507**	**1.1551**	**1.1549**	**1.1591**	**1.1583**	**1.1734**	**1.1734**

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	**1.1948**	**1.1646**	**1.1555**	**1.1418**	**1.1164**	1.0850	**1.1756**	**1.5789**	**1.8069**	**1.2309**

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	**1.1327**	**1.1758**	**1.2209**	**1.2564**	**1.2914**	**1.3381**	**1.3475**	**1.3649**	**1.3507**	**1.3425**

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	**1.3089**	**1.2843**	**1.2411**	**1.2212**	**1.2274**	**1.2557**	**1.2552**	**1.2579**	**1.2339**	**1.2128**

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	**1.1754**	**1.1386**	1.0886	1.0582	1.0711

(3C-2C)/M

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	0.0213	0.0220	0.0244	0.0247	0.0268	0.0270	0.0267	0.0270	0.0162	0.0164

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9

Pmax	0.0051	0.0053	-0.0066	-0.0064	0.0084	0.0090	0.0304	0.0316	0.0427	0.0430

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	0.0422	0.0330	0.0209	0.0535	0.0801	0.1013	0.0559	0.0477	-0.0080	-0.0077

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	0.0113	-0.0114	-0.0138	-0.0146	-0.0148	-0.0149	-0.0139	-0.0133	-0.0122	-0.0121

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	-0.0120	-0.0129	-0.0145	-0.0164	-0.0173	-0.0265	-0.0352	-0.0455	-0.0547	-0.0640

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	-0.0404	-0.0001	0.0551	0.0868	0.0758

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	C28	C27	C26	C25	C24	C23	C22	C21	C20	C19
Pmax	1.0099	1.0101	1.0113	1.0114	1.0125	1.0126	1.0125	1.0126	1.0076	1.0077

	C18	C17	C16	C15	C14	C13	C12	C11	C10	C9
Pmax	1.0024	1.0025	0.9970	0.9970	1.0039	1.0042	1.0141	1.0147	1.0196	1.0198

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	C1	C2
Pmax	1.0192	1.0152	1.0097	1.0250	1.0378	1.0486	1.0257	1.0185	0.9972	0.9966

	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Pmax	1.0053	0.9948	0.9938	0.9935	0.9936	0.9936	0.9941	0.9944	0.9948	0.9948

	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22
Pmax	0.9948	0.9944	0.9935	0.9926	0.9922	0.9882	0.9844	0.9798	0.9755	0.9711

	C23	C24	C25	C26	C27
Pmax	0.9814	1.0000	1.0264	1.0422	1.0366

Tabla 4.5.t *Resultados de cables del Puente E terminado.*

3C/2C

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	0.9873	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	1.0222	1.0211	1.0092	1.0092	1.0628	0.9374	0.9702	0.9788	1.0449

	J5	J6
dx	x	x
dy	**1.1622**	**1.1942**

3C/M

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	0.9873	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	1.0222	1.0211	1.0092	1.0092	1.0628	0.9374	0.9702	0.9788	1.0449

	J5	J6
dx	x	x
dy	**1.1622**	**1.1942**

2C/M

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	**1.5928**	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	0.0000	**1.1732**	**1.1560**	**1.1534**	**1.1768**	**1.7564**	**2.4325**	**1.9614**	**1.6327**	**1.4462**

	J5	J6
dx	x	x
dy	**1.2279**	**1.2149**

(3C-2C)/M

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	-0.0203	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	0.0260	0.0244	0.0106	0.0108	0.1103	-0.1522	-0.0584	-0.0346	0.0649

	J5	J6
dx	x	x
dy	0.1991	0.2359

[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]

	J	J5	J4	J3	J2	J1	J1	J2	J3	J4
dx	0.9922	x	x	x	x	x	x	x	x	x
dy	x	1.0120	1.0113	1.0049	1.0050	1.0400	0.9557	0.9803	0.9868	1.0265

	J5	J6
dx	x	x
dy	1.0894	**1.1065**

Tabla 4.5.u *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E terminado.*

	3C/2C	3C/M	2C/M	(3C-2C)/M	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]
			P1		
F1	1.0486	1.0486	**357.1346**	17.3434	1.0484
F2	1.0037	1.0037	**2.1409**	0.0080	1.0025
F3	1.1037	1.1037	**1.3608**	0.1411	1.0598
M1	0.9975	0.9975	**46.1084**	-0.1150	0.9976
M2	0.9904	0.9904	**13.0443**	-0.1249	0.9911
M3	0.9838	0.9838	**71.7523**	-1.1609	0.9840

Tabla 4.5.v *Resultados de pila 1 del Puente E terminado.*

A continuación se presentan los valores máximos para cada una de las partes estudiadas del Puente E indicando además la etapa en la cual se presentan.

	(3C-2C)/M				[(M+3C)/M]/[(M+2C)/M]			
	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA	Mmax	ETAPA	Vmax	ETAPA
S	1.0596	4	0.0031	3	1.1266	5	1.0021	3
I	0.5399	T	0.0016	2	1.2866	T	1.0014	2

Tabla 4.5.w *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente E.*

C	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
Pmax	0.2017	2	1.0748	2

Tabla 4.5.x *Resultados máximos de cables del Puente E.*

J	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
dx	0.9830	4	1.0396	5
dz	0.2837	3	1.1065	T

Tabla 4.5.y *Resultados máximos de desplazamientos en tablero del Puente E.*

P1	(3C-2C)/M	ETAPA	[(M+3C)/M]/ [(M+2C)/M]	ETAPA
F1	17.3434	T	1.0484	T
F2	0.3966	1	1.0357	2
F3	0.3650	1	1.0984	1
M1	0.0196	2	1.1364	1
M2	0.1170	2	1.0129	2
M3	11.8182	5	1.0126	2

Tabla 4.5.z *Resultados máximos de pila 1 del Puente E.*

Al observar las tablas anteriores se puede observar que el puente atirantado se ve muy poco afectado por la componente vertical. Las ultimas dos etapas (la etapa 5 y el puente terminado) son las que se ven mas afectadas por la componente vertical del sismo.

En el capítulo siguiente se analizan los resultados de los análisis de las distintas etapas constructivas de cada puente y se identifican las etapas y elementos mecánicos más desfavorables para su análisis posterior.

Capítulo 5 Identificación de parámetros principales

En el presente capítulo se identifican las etapas más críticas y los elementos del puente que se ven más afectados por la acción de la componente vertical con la finalidad de posteriormente realizar análisis no lineal de éstas etapas.

Como se mencionó en el capitulo anterior sólo se tomarán en cuenta los valores de las últimas dos relaciones obtenidas, de aquí en adelante renombradas como la relación A y la B, estas relaciones son:

A ... $\frac{3C - 2C}{M}$

B ... $\frac{M + 3C}{M} \Big/ \frac{M + 2C}{M}$

donde:

$\boldsymbol{M} = valor\ numérico\ resultante\ al\ realizar\ el\ análisis\ utilizando\ solamente\ carga\ muerta$

$\boldsymbol{2C} = valor\ numérico\ resultante\ al\ realizar\ el\ análisis\ de\ historia\ en\ el\ tiempo\ utilizando\ las\ dos\ componentes\ horizontales\ del\ sismo$

$\boldsymbol{3C} = valor\ numérico\ resultante\ al\ realizar\ el\ análisis\ de\ historia\ en\ el\ tiempo\ utilizando\ las\ tres\ componentes\ horizontales\ del\ sismo$

5.1. Puente recto tipo viga

- Etapa 1 (Puente A - E1)

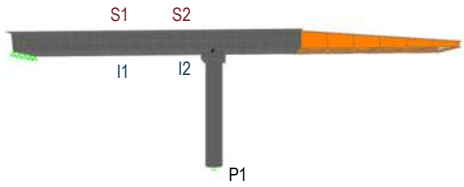


Figura 5.1.a *Partes analizadas del Puente A, etapa 1.*

En esta primera etapa la carga axial sobre la sección S1 del tablero y la pila 1, fueron las más afectadas por la componente vertical. El incremento de la relación B fue igual a 1.1751 para S1 y 1.1269 para la pila 1.

- Etapa 2 (Puente A – E2)

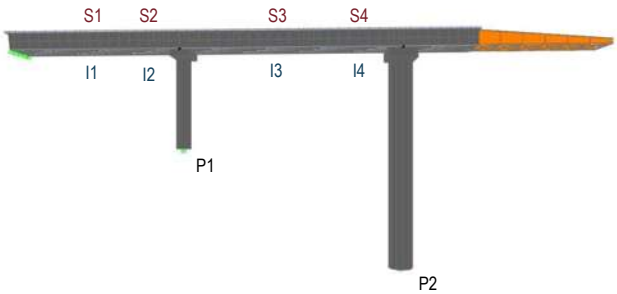


Figura 5.1.b *Partes analizadas del Puente A, etapa 2.*

La segunda etapa se ve afectada en la parte superior del tablero en todos los puntos de control. El valor más alto de la relación A es de 3.898 y se presenta en la sección S1. Por lo que toca a la relación B, el valor más alto es de 1.293 en la sección S1.

En cuanto a las pilas, solo se ve afectada la carga axial en la pila 2 para la cual se obtuvo una relación B igual a 1.3791.

- Etapa 3 (Puente A – E3)

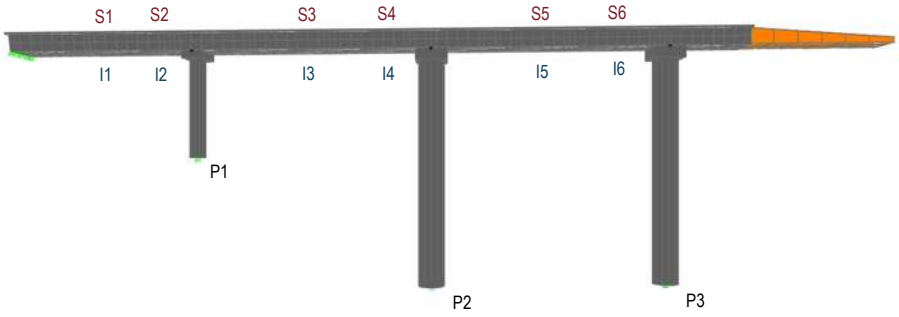


Figura 5.1.c *Partes analizadas del Puente A, etapa 3.*

En el tablero solo se ve afectada la sección del tablero S5 en la relación A con un valor de 6.127. En cambio en la relación B resultan varias relaciones con valores mayores a 10% en la parte superior del tablero e inferior, la más alta de todas siendo la relación S6 con valor de 1.2946.

Las pilas 2 y 3 se ven afectadas axialmente en la relación B. El valor más alto se encuentra en la relación B con valor de 1.3612.

- Puente Terminado (Puente A - T)

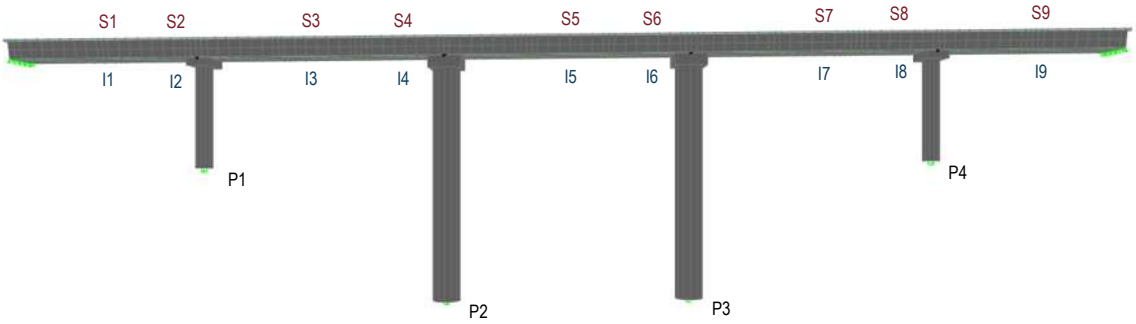


Figura 5.1.d *Partes analizadas del Puente A terminado.*

En la relación A, el puente terminado se ve afectado en la parte superior en todos los puntos de control. En la relación B se afecta tanto la parte inferior del tablero y la superior. De todos los casos el más afectado es el S6 con valor de 38.6279 Para la relación A.

Solamente las dos pilas centrales se vieron afectadas por la componente vertical de forma axial en la relación B, la más afectada es la pila 2 con valor de 1.4051.

5.2. Puente curvo

- Etapa 1 (Puente B – E1)

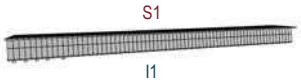


Figura 5.2.a *Partes analizadas del Puente B, etapa 1.*

En esta primera etapa se vio afectada la parte inferior del puente en la relación B en el cortante V23 con valor de 1.1264.

- Etapa 2 (Puente B – E2)

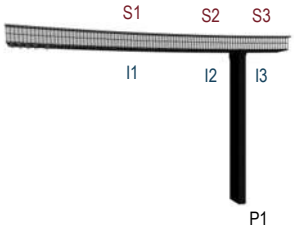


Figura 5.2.b *Partes analizadas del Puente B, etapa 2.*

La etapa 2 se ve afectada en la parte inferior del tablero en la relación B, siendo la sección mas afectada la I2 con valor de 1.2209.

La pila 1 se ve afectada en su cortante y axial, siendo mayor el cortante con valor de 4.0156.

- Etapa 3 (Puente B – E3)

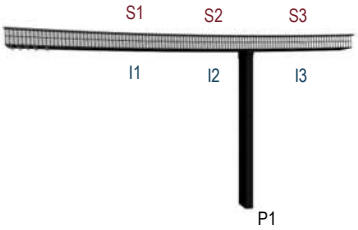


Figura 5.2.c *Partes analizadas del Puente B, etapa 3.*

El tablero de esta etapa se ve afectada de igual forma a la etapa 2 con valor máximo en el tablero de 1.2005 en la sección I2.

La pila, la cual solo se ve afectada en dirección axial muestra un valor de 1.1697.

- Etapa 4 (Puente B – E4)

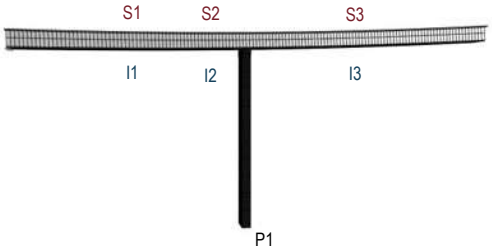


Figura 5.2.d *Partes analizadas del Puente B, etapa 4.*

Esta etapa se ve muy poco afectada, solamente la sección S2 del tablero en la relación B con valor de 1.1492.

- Puente Terminado (Puente B – T)

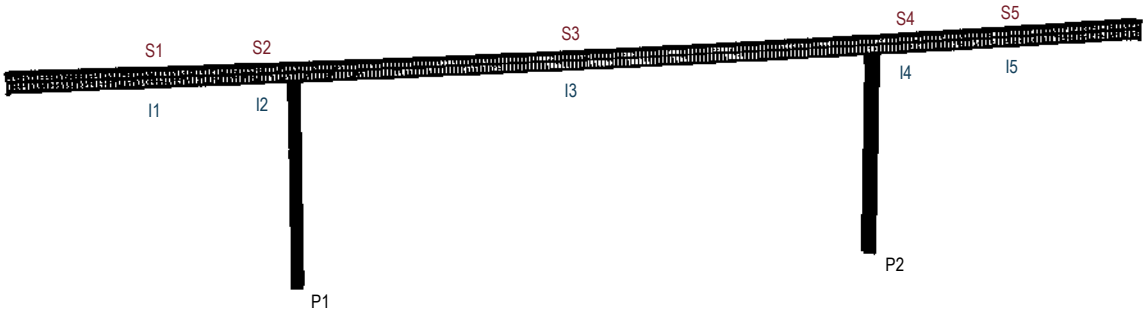


Figura 5.2.e *Partes analizadas del Puente B terminado.*

El puente terminado se ve afectado solamente en la sección I2 del tablero en el momento M11 en la relación B con valor de 1.1611.

El cortante y momento de ambas pilas también se ve incrementado más del 10% en la relación A. La pila que se ve mas afectada es la pila 1 con un valor de 2.8489 en el momento y de 1.9722 en cortante.

5.3. Puente voladizo balanceado

- Etapa 1 (Puente C – E1)

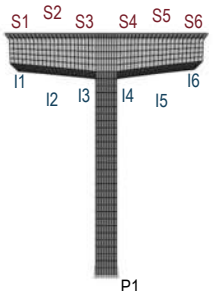


Figura 5.3.a *Partes analizadas del Puente C, etapa 1.*

El tablero de esta etapa se ve afectado en varios puntos de control en la relación B, el mayor se ubica en la sección S3 con valor de 1.3572. La pila no se ve afectada.

- Etapa 2 (Puente C – E2)

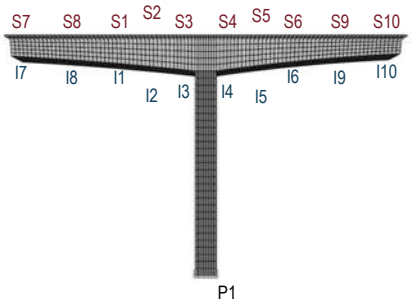


Figura 5.3.b *Partes analizadas del Puente C, etapa 2.*

La etapa 2 se ve afectada tanto en la parte superior como inferior del tablero en la relación B, siendo la más afectada la parte inferior I5 con valor de 1.3298. La pila no se ve perjudicada.

- Etapa 3 (Puente C – E3)

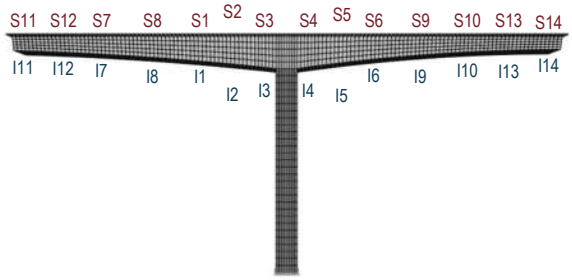


Figura 5.3.c *Partes analizadas del Puente C, etapa 3.*

La etapa 3 se ve muy poco afectada, tan solo una sección inferior del tablero se vio afectada por la componente vertical en la relación B, esta es la sección I2 con valor de 1.1016.

- Etapa 4 (Puente C – E4)

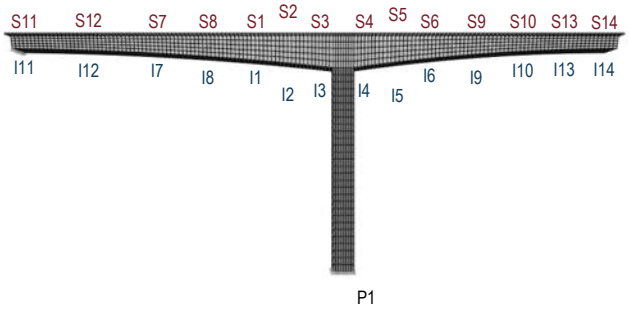


Figura 5.3.d *Partes analizadas del Puente C, etapa 4.*

La etapa cuatro se ve afectada tanto en la parte inferior del tablero como en la superior en la relación B, sin embargo la sección S3 es la más afectada con valor de 1.3833. Al igual que en todas las demás etapas, la pila no se ve afectada.

- Puente Terminado (Puente C – T)

Figura 5.3.e *Partes analizadas del Puente C terminado.*

El puente atirantado terminado resulta afectado en varias secciones, tanto en la parte superior como inferior del tablero. La que más se ve afectada es la sección S3 con valor de 1.3989. Además es la única que presenta aumentos mayores al 10% en la pila, en el momento M1 con valor de 1.5435.

5.4. Puente en arco

- Etapa 1 (Puente D – E1)

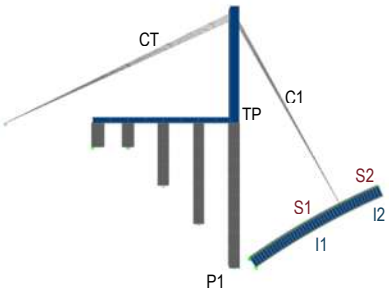


Figura 5.4.a *Partes analizadas del Puente D, etapa 1.*

La etapa 1 no se ve afectada en lo absoluto por la componente vertical.

- Etapa 2 (Puente D – E2)

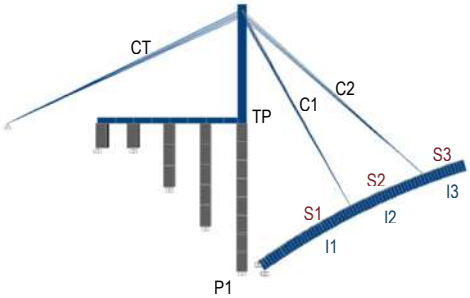


Figura 5.4.b *Partes analizadas del Puente D, etapa 2.*

La etapa dos tampoco se ve afectada por la componente vertical.

- Etapa 3 (Puente D – E3)

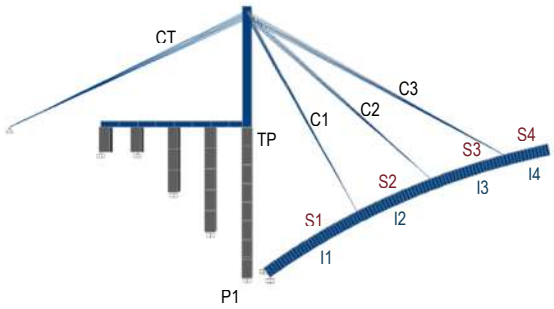


Figura 5.4.c *Partes analizadas del Puente D, etapa 3.*

Al igual que las etapas anteriores, la etapa 3 no se ve afectada por la componente vertical en lo absoluto.

- Etapa 4 (Puente D – E4)

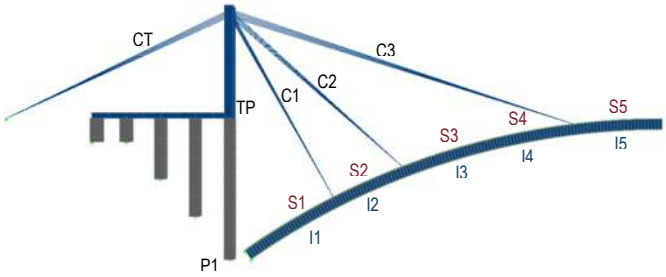


Figura 5.4.d *Partes analizadas del Puente D, etapa 4.*

Esta etapa 4 se ve afectada solamente en la pila 1, en el cortante y en la relación A donde resulta un valor de 2.0.

- Puente Terminado (Puente D – T)

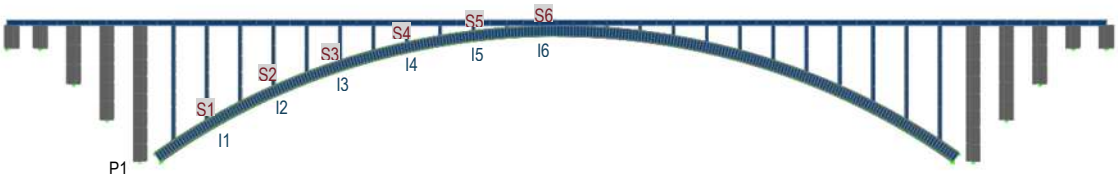


Figura 5.4.e *Partes analizadas del Puente D, etapa 5.*

De igual forma que en la etapa anterior, el puente terminado solamente se ve afectado en la pila 1. El cortante de la pila resulta con valor de 2.3413 en la relación A y en dirección axial resulta un valor de 1.1851 en la relación B.

5.5. Puente atirantado

- Etapa 1 (Puente E – E1)

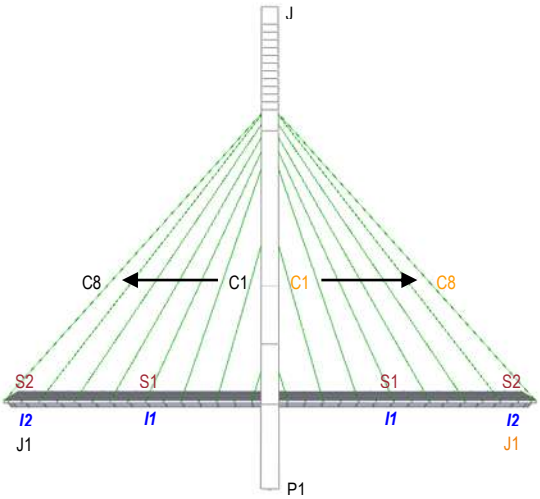


Figura 5.5.a *Partes analizadas del Puente E, etapa 1.*

La primera etapa del puente atirantado solo se ve afectado en el momento M1 de la pila 1 en la relación B con valor de 1.1364.

- Etapa 2 (Puente E – E2)

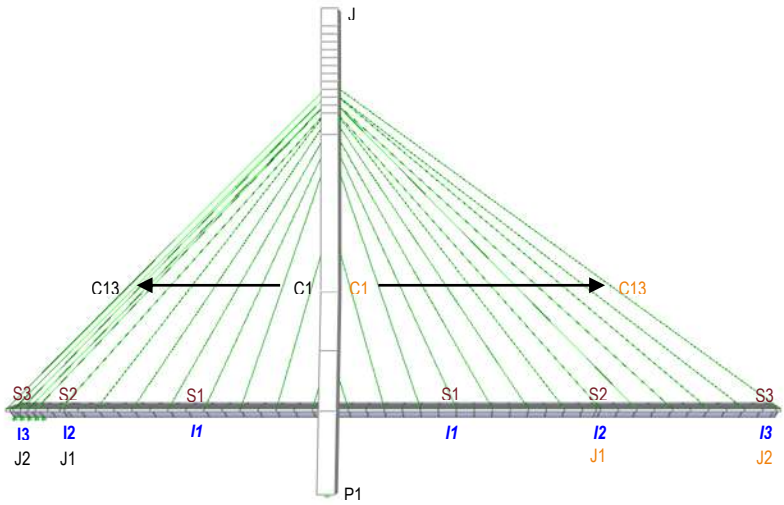


Figura 5.5.b *Partes analizadas del Puente E, etapa 2.*

La etapa 2 no muestra ninguna sección donde alguna de las relaciones haya resultado mayor al 10%.

- Etapa 3 (Puente E – E3)

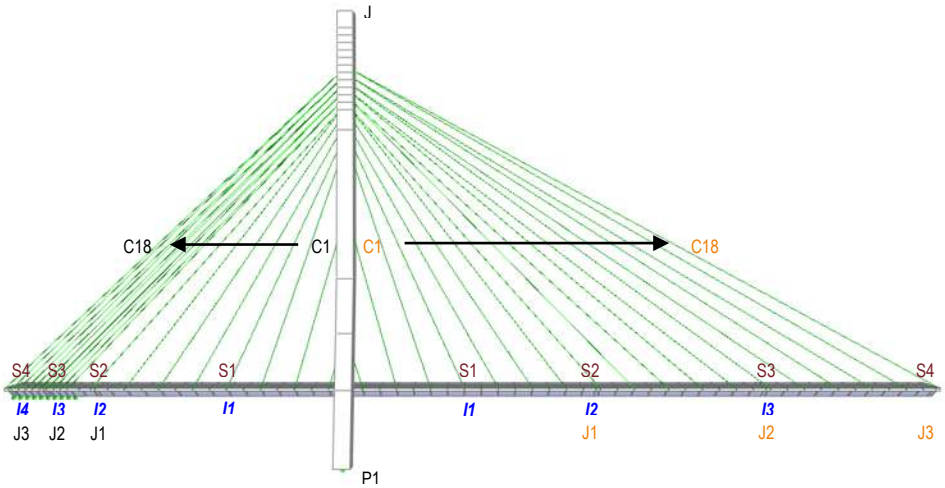


Figura 5.5.c *Partes analizadas del Puente E, etapa 3.*

Ningún elemento de la etapa 3 resulto afectado por la componente vertical.

- Etapa 4 (Puente E – E4)

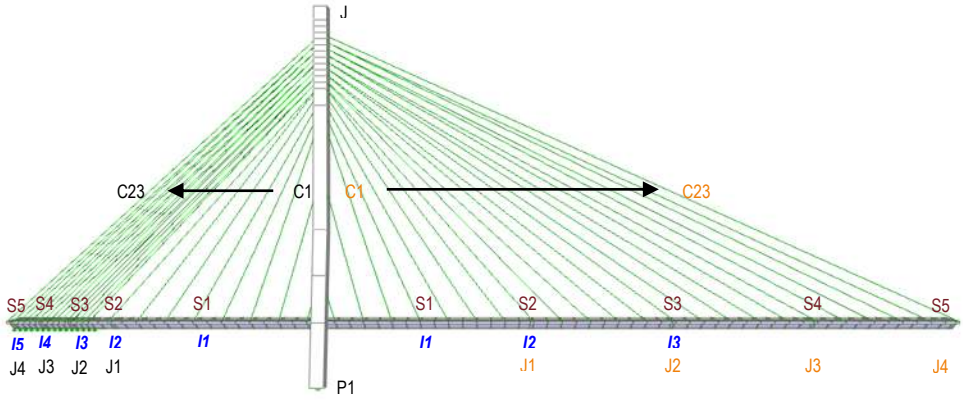


Figura 5.5.d *Partes analizadas del Puente E, etapa 4.*

La cuarta etapa se ve afectada solo en la sección inferior del tablero I2 de la relación B con un valor de 1.1085.

- Etapa 5 (Puente E – E

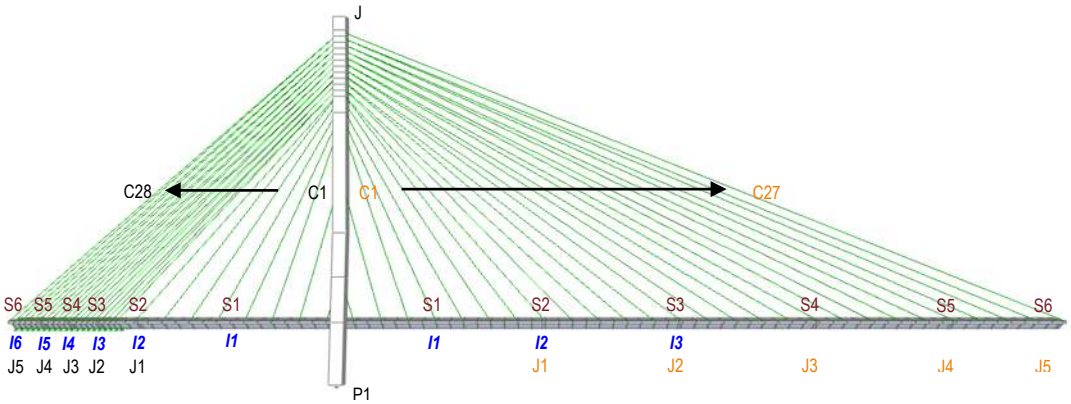


Figura 5.5.e *Partes analizadas del Puente E, etapa 5.*

La etapa 5 de este puente se fe afectada en el tablero, más precisamente en la sección S2 con un valor resultante de 1.1266 y la sección I2 en la relación B con un valor de 1.2763.

A diferencia de todas las demás etapas, la pila se ve afectada en el momento M3 con valor de 11.8182.

- Puente Terminado (Puente E – T)

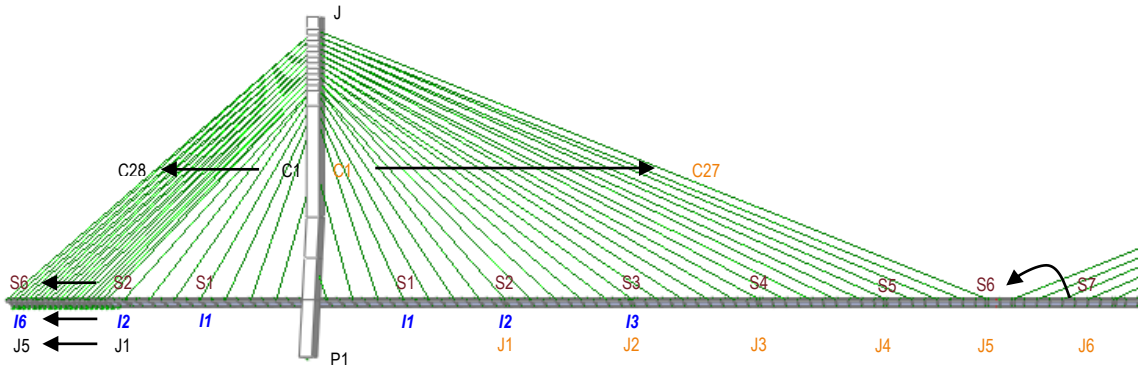


Figura 5.5.f *Partes analizadas del Puente E terminado.*

El puente E terminado resulto afectado por la componente vertical en el tablero y en la pila. El tablero resulto afectado el desplazamiento vertical del nodo J6 en la relación B con un valor de 1.1065, así como el momento de la sección I2 de la parte inferior del tablero con un valor de 1.2866.

La pila resultó afectada en su cortante en dirección longitudinal del puente en la relación A con un valor de 17.3434.

En la siguiente tabla se observa de forma resumida los casos más críticos de cada puente para la relación B. En ella se indica la sección donde se presenta el caso más crítico así como el esfuerzo y su valor.

PUENTE	ETAPA	SECCIÓN	ESFUERZO	VALOR
A	T	P2	Axial	1.4051
B	2	I2	Mmax	1.2209
C	T	P1	M2	1.5435
D	T	P1	Axial	1.1851
E	T	I2	Mmax	1.2866

Tabla 5.5.a *Casos más críticos de cada puente para la relación B.*

Capítulo 6 Análisis no lineal

Con base en los resultados que se presentan en el capítulo anterior, se realizó el análisis no lineal en la historia del tiempo de los primeros tres tipos de puentes, debido a que los últimos dos, el puente en arco y el puente atirantado, resultaron poco afectados por la componente vertical. Para cada uno de los primeros tres tipos de puentes se analizó el caso más crítico, éstos son, el puente terminado para los puentes A y C y la etapa 2 para el Puente B (ver Tabla 5.5.a del capítulo anterior).

Para el análisis se utilizó el programa Perform 3D versión 5.0.0. Se consideró tanto la no linealidad geométrica como la no linealidad del material en cada uno de los análisis.

6.1. Registros sísmicos

Debido a que las normas de diseño generalmente recomiendan considerar un mínimo de 7 registros sísmicos para análisis no lineales, se optó por seleccionar 10 registros de los 100 recopilados en el capítulo 3 (ver Tabla 6.1.a). La selección se basó en la relación aceleración máxima del terreno vertical / aceleración máxima del terreno horizontal (PGA_V/PGA_H) escogiendo los 10 con la relación más alta que son los que se muestran en la Tabla 6.1.a.

No.	Fecha	Clave Est.	Magnitud	Distancia	Tipo Suelo	Profundidad	PGA_V/PGA_H
1	15-10-79	IAGS	6.6	2.792	Sedimentos	10	2.53
2	09-07-80	VICS	6.1	9.366	Sedimentos	12	1.04
3	29-01-90	ARTG	5.1	28.452	Roca	39	0.89
4	08-02-88	BALC	5	57.561	Roca	19	1.13
5	25-04-89	ACAC	6.5	55.211	Arena - Limo - Arcilla	19	0.94
6	02-05-89	XALT	5.1	55.278	Roca	13	1.69
7	13-01-90	XALT	5	31.94	Roca	12	1.38
8	29-12-99	PTSU	5.9	46.461	Conglomerado Sobre Lutitas	82	0.84
9	29-12-99	UNIO	5.1	13.89	Roca	82	1.08
10	21-06-99	VILD	6	49.787	Brecha Andesitica	54	0.88

Tabla 6.1.a *Registros sísmicos utilizados para el análisis no lineal.*

El periodo de construcción de cualquier estructura es un tiempo limitado, por tal motivo el periodo de retorno (T_R) que se utiliza para una estructura en construcción no corresponde al que se propone para diseño. El tiempo de construcción (T_c) depende del tipo de puente y del

procedimiento de construcción que se siga. En la siguiente tabla se muestra el tiempo de construcción (T_c) considerado para los métodos constructivos que se estudiaron en el presente trabajo, sin embargo, el análisis no lineal se efectuara únicamente a dos puentes empujados y a uno en doble voladizo.

PROCEDIMIENTO	T_c (años)
Empujado	1 a 3 años
Atirantado	5 años
Arco	5 años
Doble voladizo	3 años

Tabla 6.1.b *Tiempo de construcción (T_c) considerado para diferentes procedimientos constructivos.*

Considerando los eventos sísmicos como independientes, el periodo de retorno correspondiente a la etapa constructiva se obtiene con la siguiente expresión:

$$T_r = \frac{1}{1-(1-p)^{\frac{1}{t_c}}}$$

donde:

$p = probabilidad\ de\ excedencia$

El Eurocódigo 8 – Parte 2 (2003) recomienda que p no sea mayor de 0.05. Los periodos de retorno para $p = 0.05$ y los años de construcción indicados en la tabla anterior son:

PROCEDIMIENTO	T_R (años)
Empujado	20 a 60 años
Atirantado	100 años
Arco	100 años
Doble voladizo	60 años

Tabla 6.1.c *Periodo de retorno correspondiente a la etapa constructiva de cada procedimiento constructivo.*

La aceleración para la etapa de construcción (a_{cons}) se obtiene con la siguiente expresión (Eurocódigo 8 – Parte 2, 2005):

$$a_{cons} = a_{g,475}\left(\frac{T_R}{T_{R475}}\right)^{0.35}$$

donde:

$a_{g,475}$ y $T_{R475} = aceleración\ y\ periodo\ de\ retorno\ para\ fines\ de\ diseño$ (475 años)

Los valores de la aceleración para fines de construcción son:

PROCEDIMIENTO	$a_{cons}/a_{g,475}$
Empujado	0.33 a 0.48
Atirantado	0.58
Arco	0.58
Doble voladizo	0.48

Tabla 6.1.d *Relación $a_{cons}/a_{g,475}$ para diferentes métodos constructivos.*

En la siguiente tabla se presentan los datos del conjunto de registros sísmicos utilizados en el análisis no lineal de historia en el tiempo donde las cuatro últimas columnas corresponden a la aceleración máxima del registro en la dirección horizontal 1 (a_{H1max}), la horizontal 2 (a_{H2max}) la vertical (a_{Vmax}) y al factor de escala (F.S.) aplicado a cada registro para escalarlo a la aceleración de construcción considerada de 350 gales × 1.5 = **525 gales**. Los 350 gales corresponden a la aceleración de diseño considerada (aceleración promedio aproximada de las costas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca) y el valor de 1.5 corresponde al factor de importancia por tratarse de estructuras tipo A.

No.	Clave Est.	Magnitud	Distancia	Profundidad	PGA_V/PGA_H	a_{H1max}	a_{H2max}	a_{Vmax}	F.S.
1	IAGS	6.6	2.792	10	2.53	351.42	229.87	-889.35	0.28
2	VICS	6.1	9.366	12	1.04	-958.66	874.64	-993.98	0.25
3	ARTG	5.1	28.452	39	0.89	-19.18	-26.59	-23.78	9.48
4	BALC	5	57.561	19	1.13	-38.28	38.28	43.07	5.85
5	ACAC	6.5	55.211	19	0.94	-116.8	-101.21	109.94	2.16
6	XALT	5.1	55.278	13	1.69	14.87	14.89	25.15	10.2
7	XALT	5	31.94	12	1.38	47.64	-34.07	66.05	3.82

8	PTSU	5.9	46.461	82	0.84	-35.54	47.92	-40.13	5.26
9	UNIO	5.1	13.89	82	1.08	54.21	-62.70	-67.87	3.71
10	VILD	6	49.787	54	0.88	-46.31	-48.07	42.17	5.24

Tabla 6.1.e *Datos de los registros sísmicos utilizados en el análisis no lineal.*

6.2. Propiedades de las secciones de las pilas de los puentes

Cada pila de los puentes analizados de forma no lineal se diseñó de acuerdo con la normativa del Instituto Mexicano del Transporte encontrada en el libro titulado *Proyecto*, tema *Carreteras* y parte 6: *Proyectos de Puentes y Estructuras*.

A continuación se presenta la configuración del armado, los diagramas de interacción y los diagramas momento-curvatura de cada pila. Los elementos fueron diseñados previamente mediante el programa SAP 2000 versión 14.2.

Cada pila se modeló como un elemento compuesto de una sección no lineal, correspondiente a una articulación plástica concentrada en la base de la pila P-M2-M3 y definida mediante los diagramas antes mencionados, y una sección lineal para el resto de la altura del elemento.

La longitud de la articulación se obtuvo con la siguiente expresión propuesta por Priestley, Seible y Calvi (1996):

$$L_{ap} = 0.008L + 0.022f_{ye}d_{bl} \geq 0.044f_{ye}d_{bl}$$

donde:

$L = altura\ total\ de\ la\ pila$

$d_{bl} = diámetro\ de\ refuerzo\ longitudinal$

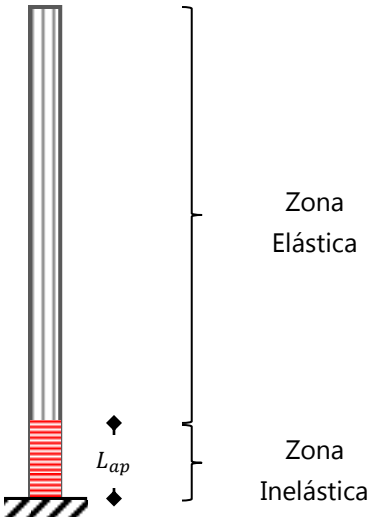


Figura 6.2.a *Esquema de pilas modeladas mediante dos elementos.*

Además se presentan las fuerzas resultantes de las pilas para los siguientes 3 casos:

1. Considerando solamente la carga muerta (CM).
2. Considerando carga muerta, sismo en "y" y sismo en "x" (CM+2C).
3. Considerando carga muerta, sismo en "y", sismo en "x" y sismo vertical (CM+3C).

- **Puente recto tipo viga**

Figura 6.2.b *Puente C terminado.*

El Puente A esta conformado por dos diferente pilas. Las más altas tienen 45 m de altura y las otras son de 20 m de altura. Las más altas tienen un diámetro de 5.5 m y un espesor de 0.75 m, las otras tienen un diámetro de 3 m y un espesor de 0.5 m. Las pilas altas resultaron con un porcentaje de acero de 1.06% y las de menor altura de 1.07%. Se confinaron las pilas con espirales

de varillas del número 4 con una separación entre espiral de 35 cm y se utilizaron varillas longitudinales del número 10 con la configuración que se muestra a continuación:

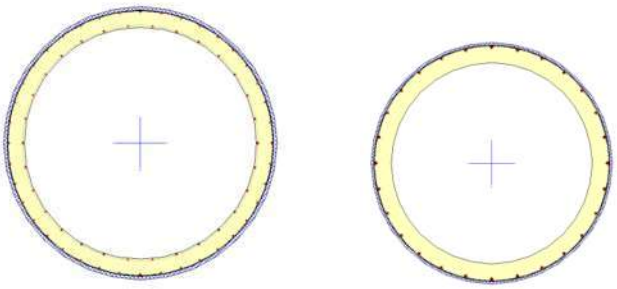


Figura 6.2.c *Configuración del armado de las pilas de mayor altura (izq.) y las de menor altura (der.) del Puente A terminado.*

En las siguientes figuras se muestra el diagrama de interacción de las pilas más altas así como el diagrama momento - curvatura para una fuerza axial de 1878 t a compresión que es la que se produce por las cargas muertas durante la construcción.

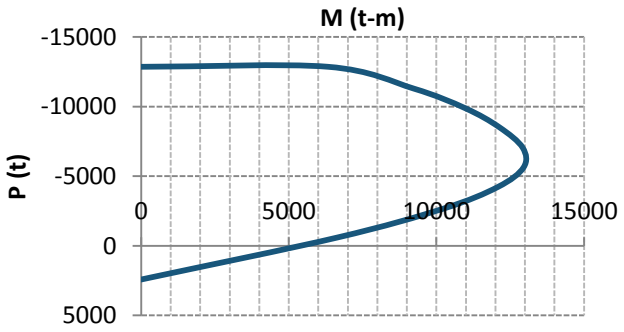


Figura 6.2.d *Diagrama de interacción de la pilas de mayor altura del Puente A terminado.*

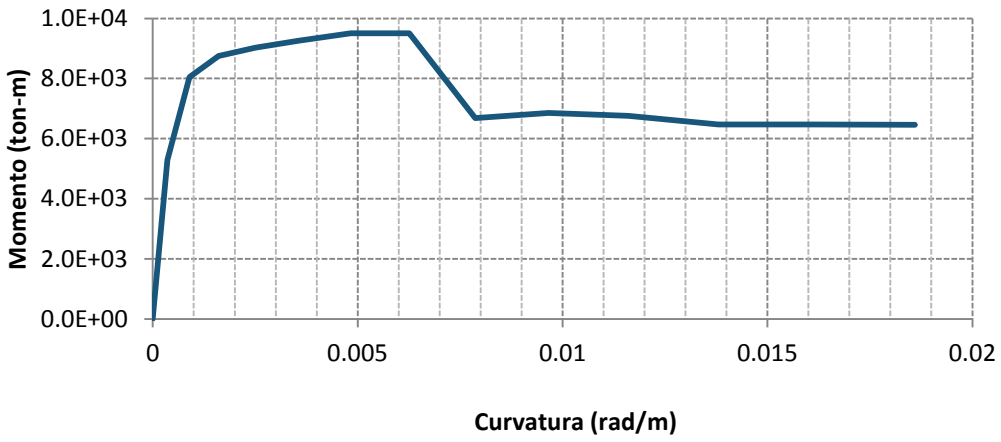


Figura 6.2.e *Diagrama Momento – Curvatura de las pilas de mayor altura del Puente A terminado.*

De igual forma pero para las pilas de menor altura, a continuación se muestra el diagrama de interacción y el diagrama momento - curvatura para una fuerza axial de 1077 t a compresión, que corresponde a la carga que se presenta durante la construcción.

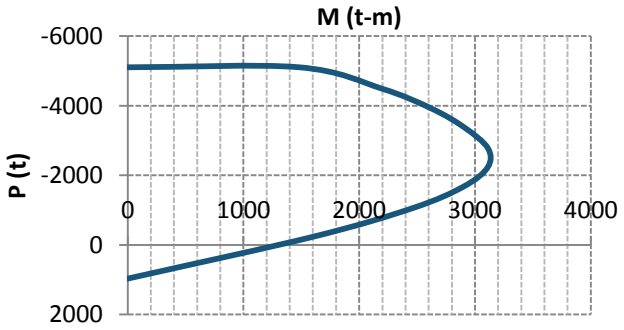


Figura 6.2.f *Diagrama de interacción de las pilas de menor altura del Puente A terminado.*

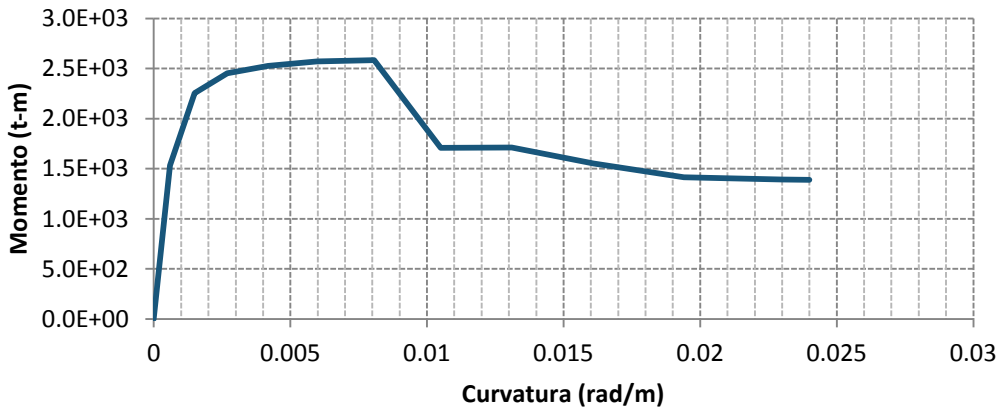


Figura 6.2.g *Diagrama Momento – Curvatura de la pilas de menor altura del Puente A terminado.*

Debido a que la etapa crítica de este puente resulto ser el puente terminado se realiza un segundo análisis considerando condiciones para puente nuevo donde se incluye el peso muerto total de la estructura (peso de la carpeta asfáltica, parapetos, banquetas, tuberías, conductos cables y demás instalaciones para servicios públicos) y, se somete a sismos con aceleración de diseño sin considerar el periodo de construcción, i.e. la aceleración de diseño no es multiplicada por la relación $a_{cons}/a_{g,475}$ de la Tabla 6.1.d. A continuación se presentan los diagramas de interacción y momento – curvatura de cada una de las dos pilas del puente.

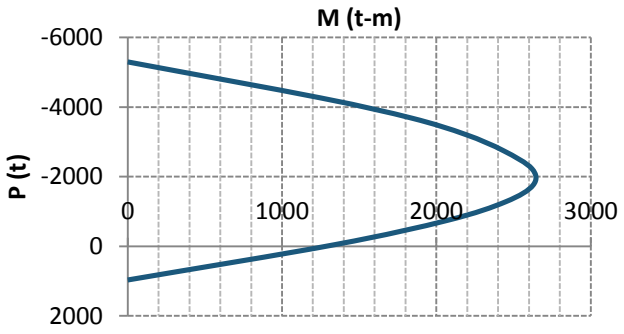


Figura 6.2.h *Diagrama de interacción de las pilas de menor altura del Puente A terminado con condiciones para puente nuevo.*

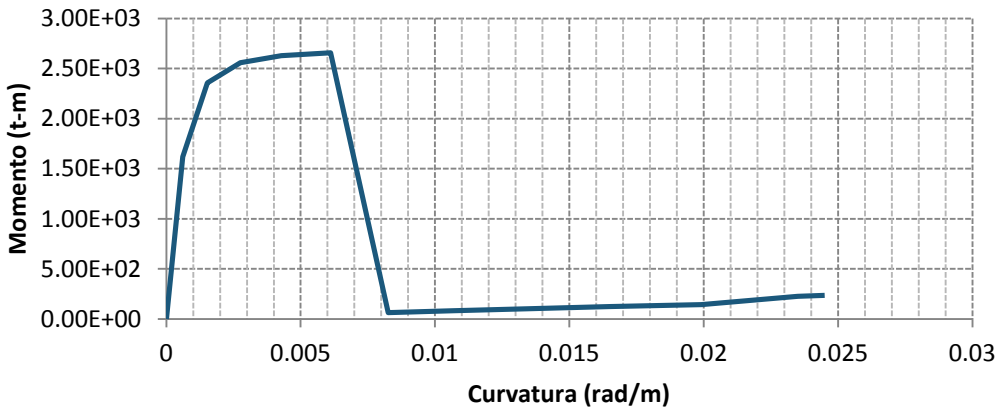


Figura 6.2.i *Diagrama Momento – Curvatura de la pilas de menor altura del Puente A terminado condiciones para puente nuevo.*

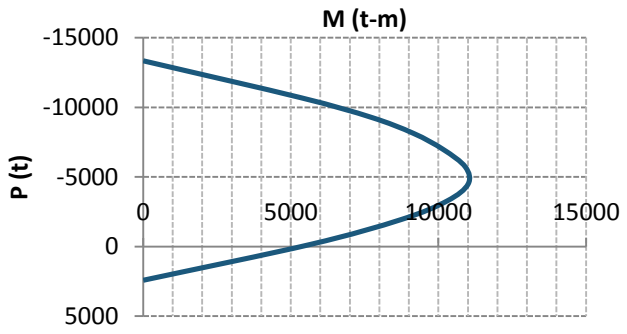


Figura 6.2.j *Diagrama de interacción de las pilas de mayor altura del Puente A terminado con condiciones para puente nuevo.*

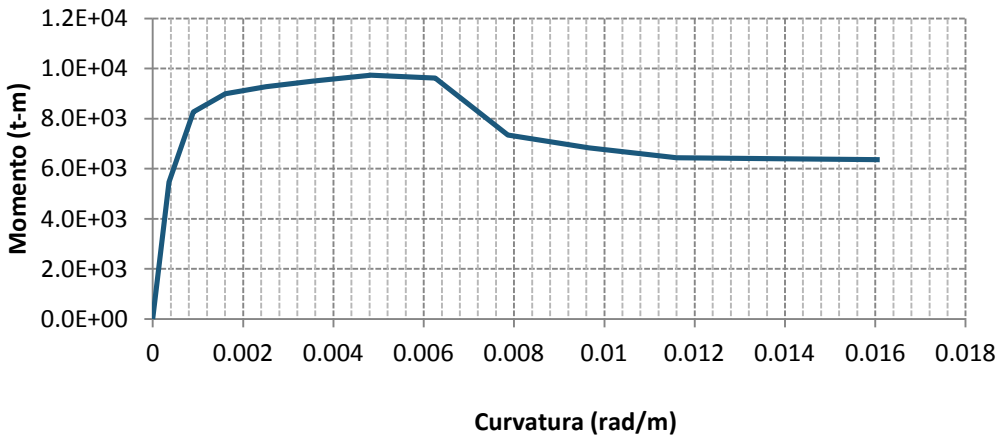


Figura 6.2.k *Diagrama Momento – Curvatura de la pilas de mayor altura del Puente A terminado con condiciones para puente nuevo.*

- **Puente curvo**

Figura 6.2.l *Puente B, etapa 2.*

La pila del Puente B es de sección rectangular hueca de 8 x 5 m (mayor que la utilizada en los análisis lineales de 8 x 3 m debido a que falla por pandeo) con espesor de 0.8 m en el lado corto, 1.0 m en el lado largo y 61 m de altura. Se colocaron estribos número 4 a cada 0.3 m. la sección tiene un recubrimiento de 0.10 m y varillas numero 10 de forma longitudinal las cuales conforman un porcentaje de acero de 1.12% y que tienen la configuración que se muestra en la siguiente figura:

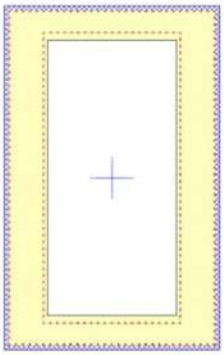


Figura 6.2.m *Configuración del armado de la pila del Puente B, etapa 2.*

En las siguientes figuras se muestran los diagramas de interacción y los de momento – curvatura para una carga axial de 13,641 t a compresión de la sección a 0° y a 90°.

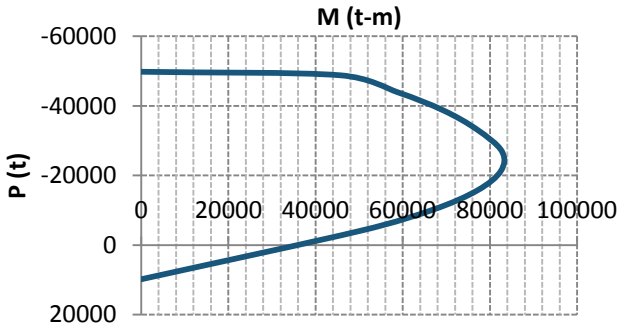


Figura 6.2.n *Diagrama de interacción a 0° de la pila del Puente B, etapa 2.*

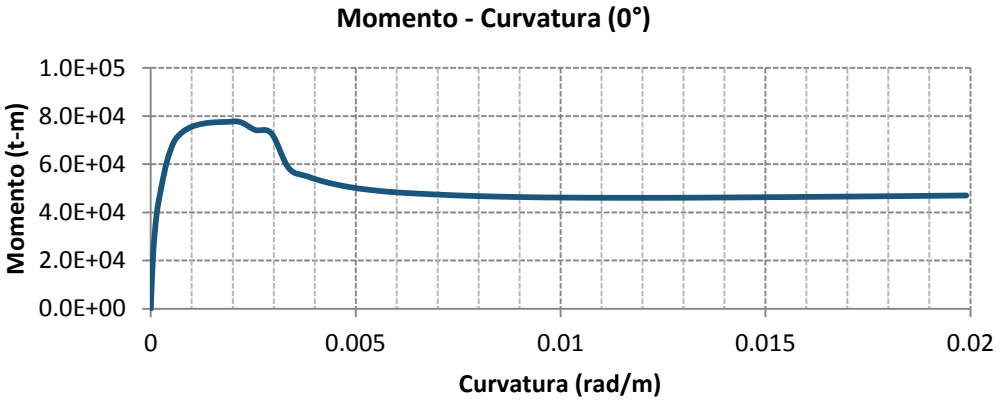


Figura 6.2.o *Diagrama Momento – Curvatura a 0° de la pila del Puente B, etapa 2.*

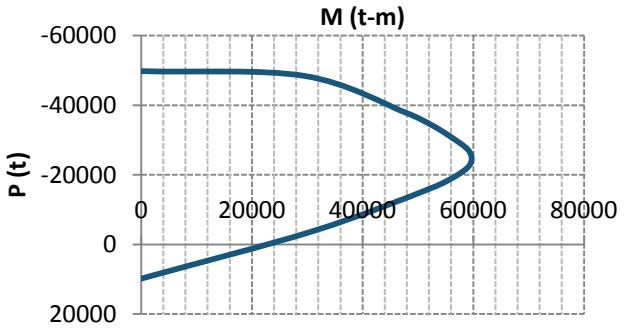


Figura 6.2.p *Diagrama de interacción a 90° de la pila del Puente B, etapa 2.*

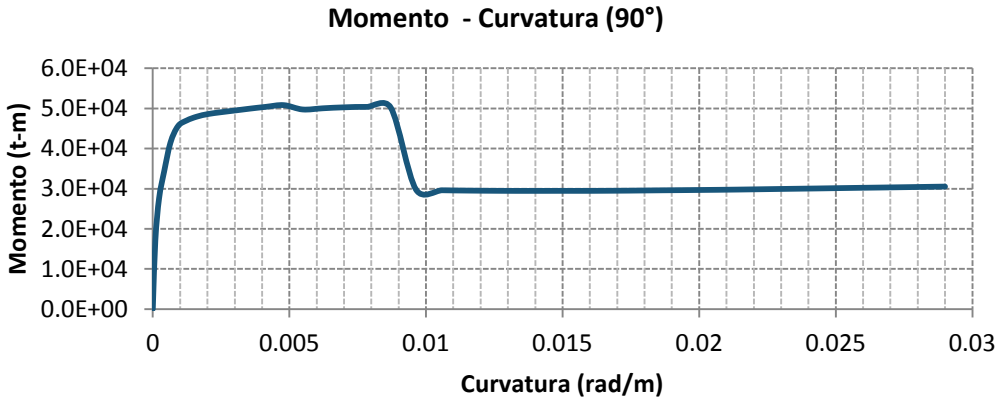


Figura 6.2.q *Diagrama Momento – Curvatura a 90° de la pila del Puente B, etapa 2.*

- **Puente en voladizos balanceados**

Figura 6.2.r *Puente C terminado.*

El Puente C cuenta con unas pilas de 58 m de altura de sección hueca de 6.0 x 6.0 m con espesor de 0.8 m. Esta reforzada con varillas longitudinales del número 10 con porcentaje de acero de

1.13% y estribos de varillas del número 4 a cada 0.3 m. La configuración de las varillas longitudinales se muestra en la siguiente figura:

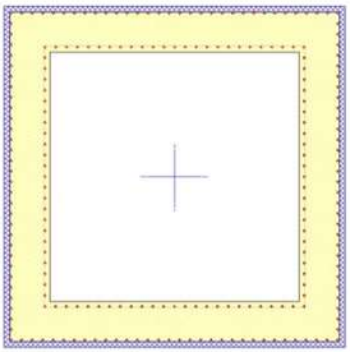


Figura 6.2.s *Configuración del armado de la pilad del Puente C terminado.*

A continuación se muestran los diagramas de interacción y el de momento – curvatura para una carga axial de 6123 t a compresión.

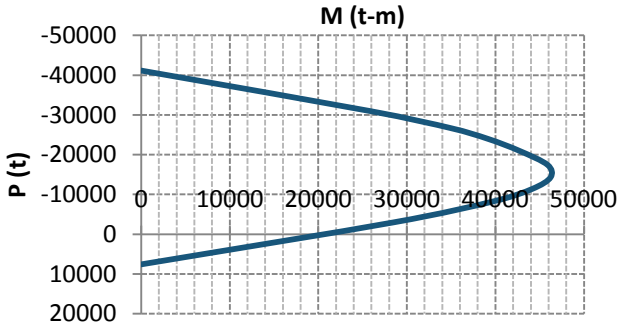


Figura 6.2.t *Diagrama de interacción de la pila del Puente C terminado.*

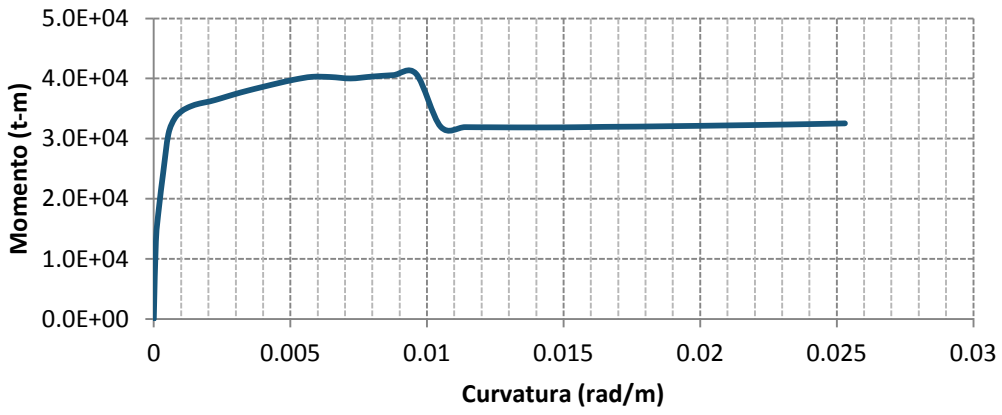


Figura 6.2.u *Diagrama Momento – Curvatura de la pila del Puente C terminado.*

Al igual que en el Puente A, la etapa más crítica del Puente C es la terminada por lo que también se análisis considerando condiciones para puente nuevo. Las siguiente figuras muestran el diagrama de interacción y momento – curvatura de las pilas del puente.

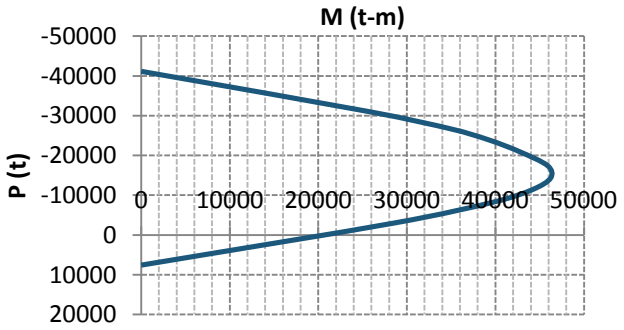


Figura 6.2.v *Diagrama de interacción de la pila del Puente C terminado con condiciones para puente nuevo.*

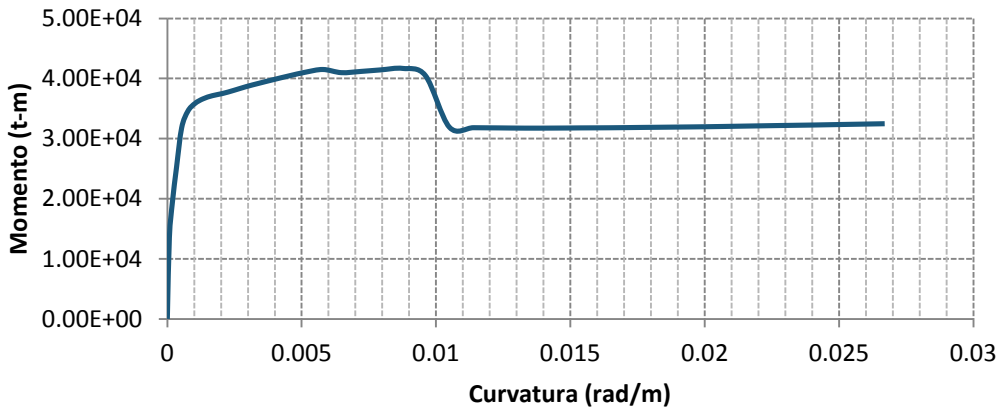


Figura 6.2.w *Diagrama Momento – Curvatura de la pila del Puente C terminado con condiciones para puente nuevo.*

6.3. Resultados del análisis

Para cada una de las etapas constructivas consideradas se ejecutaron dos análisis, uno solamente con las dos componentes horizontales (2C) y otro tomando en cuenta las dos horizontales y la vertical (3C). A continuación se presentan las relación 3C/2C de fuerza axial (Tabla 6.3.a) y del momento máximo (Tabla 6.3.b) en la articulación de cada una de las pilas (P1, P2, P3 y P4) y para cada uno de los sismos. En la siguientes dos tablas P A T, P B E2 y P C T corresponden a Puente A Terminado, Puente B Etapa 2 y Puente C Terminado respectivamente. Un valor con signo negativo en la tabla indica que la fuerza resultante fue menor considerando las tres componentes que al utilizar solo dos, el signo positivo indica lo contrario. En la Tabla 6.3.a se observa un incremento de la fuerza axial sobre la pila de 32.71% en las pilas extremas del puente A, y de 23.53% y 27.8% en las pilas centrales del mismo puente. En el caso del puente B la carga axial creció 36.87% cuando se consideró el sismo 8. En el puente C, el efecto fue moderado pues el máximo incremento se presentó con el sismo 10 y fue de 7.51%.

Sismo	P A T				P B E2	P C T	
	P1	P2	P3	P4	P1	P1	P2
1	0.44%	6.57%	3.09%	3.71%	3.26%	1.00%	-1.01%
2	10.36%	9.66%	12.74%	9.23%	17.22%	-0.50%	-0.35%

3	6.96%	8.94%	8.57%	8.06%	3.95%	1.89%	2.68%
4	6.39%	**27.82%**	20.25%	12.53%	11.54%	6.97%	3.09%
5	10.06%	21.57%	**23.53%**	22.82%	17.88%	0.76%	1.16%
6	17.90%	17.15%	18.69%	23.06%	17.61%	1.45%	4.63%
7	6.79%	16.48%	16.32%	8.82%	3.69%	2.97%	1.45%
8	9.10%	11.54%	9.44%	**32.71%**	**36.87%**	4.51%	5.65%
9	2.88%	3.70%	4.36%	3.75%	7.96%	2.27%	0.31%
10	5.86%	21.19%	22.05%	14.62%	16.58%	**7.51%**	1.43%

Tabla 6.3.a *Relaciones 3C/2C de la fuerza axial resultante en la articulación.*

Las figuras siguientes muestran la historia en el tiempo de la carga axial para el caso más crítico de cada uno de los puentes. En cada figura se muestra la historia en el tiempo de la carga axial con tres componentes (color rojo al fondo) y la historia en el tiempo con dos componentes (color azul al frente). Claramente se observa que el puente más afectado por la componente vertical es el puente B.

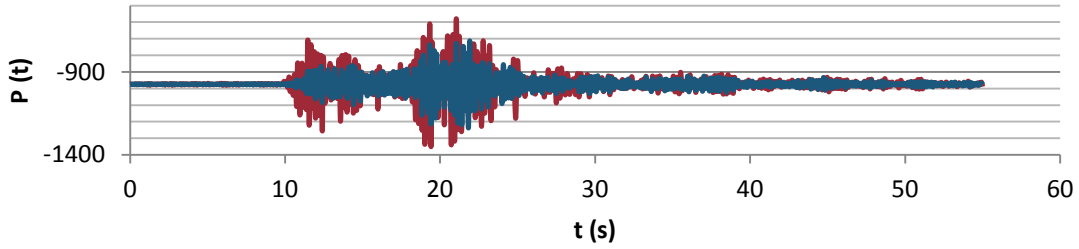


Figura 6.3.a *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

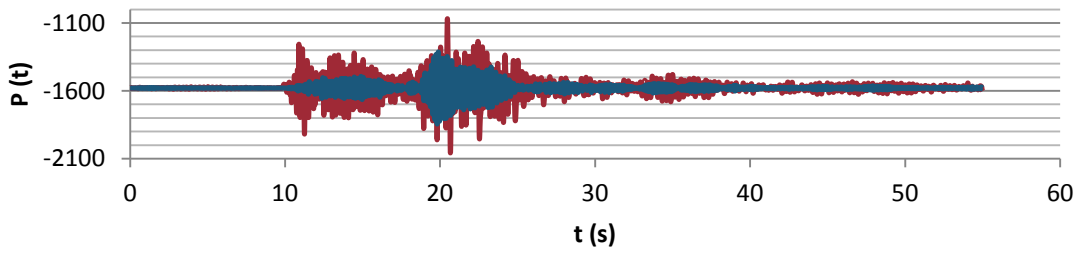


Figura 6.3.b *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

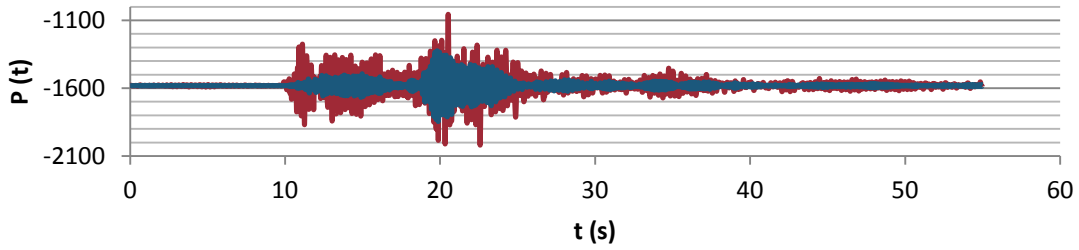


Figura 6.3.c *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 3 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

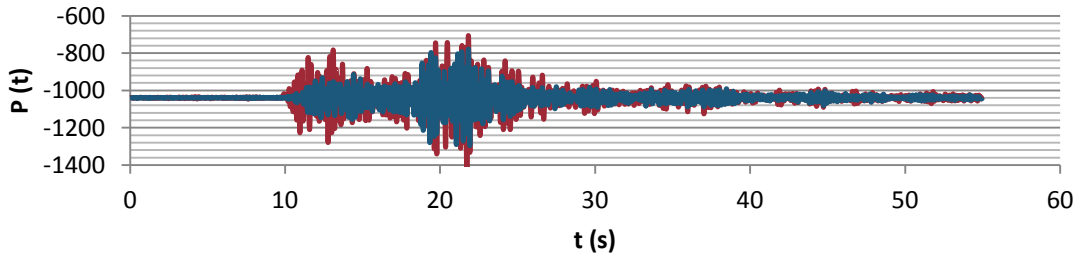


Figura 6.3.d *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 4 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

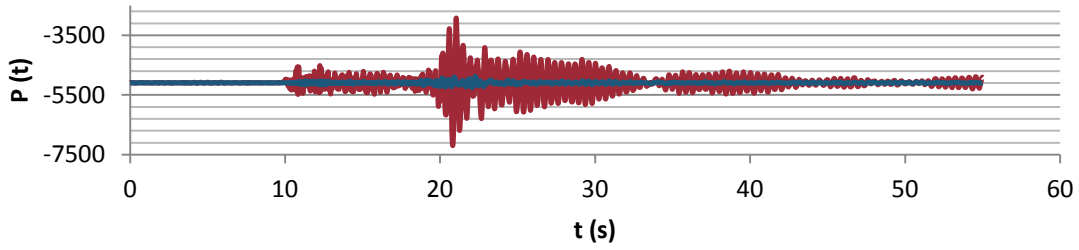


Figura 6.3.e *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente B etapa 2, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

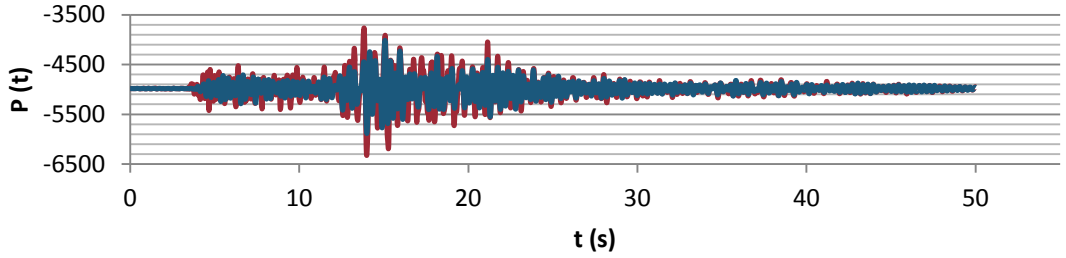


Figura 6.3.f *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente C terminado, sismo 10, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

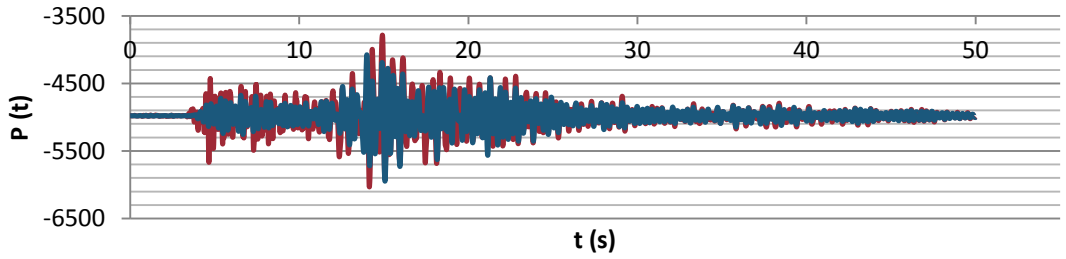


Figura 6.3.g *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente C terminado, sismo 10, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo).*

En algunas de las pilas se observa que la carga axial que se produce cuando actúa la componente vertical, supera en una buena parte de la historia de carga, a la máxima fuerza axial que se produce cuando no se considera esta componente. En especial, en la pila del puente B (figura 6.3.e) la fuerza axial que se produce con la componente vertical incluida, supera en toda la historia de carga a la máxima fuerza axial que se produce con las dos componentes horizontales.

Sismo	P A T				P B E2	P C T	
	P1	P2	P3	P4	P1	P1	P2
1	-0.02%	-0.01%	-0.01%	-0.02%	-0.04%	0.05%	-0.01%
2	0.10%	-0.01%	-0.01%	0.09%	-0.04%	0.03%	-0.01%
3	0.07%	0.02%	0.02%	0.08%	-0.13%	0.11%	-0.01%
4	0.09%	0.02%	0.03%	0.01%	-0.09%	-0.10%	-0.01%
5	-2.65%	2.12%	2.24%	-1.62%	0.00%	-0.04%	-0.01%
6	-0.08%	0.03%	0.03%	-0.07%	0.04%	0.25%	0.10%
7	-0.04%	0.07%	0.08%	-0.04%	0.12%	0.56%	0.01%
8	-0.87%	-0.63%	0.80%	-0.95%	0.03%	0.07%	0.10%
9	-0.03%	-0.05%	-0.05%	-0.04%	0.12%	-0.02%	0.01%
10	0.04%	-1.50%	-1.84%	0.08%	0.01%	0.07%	0.09%

Tabla 6.3.b *Relaciones 3C/2C del momento máximo en la articulación.*

Como se observa en la tabla anterior (Tabla 6.3.b) el efecto de la componente vertical del sismo resulta muy limitado desde el punto de vista del momento en la base de la pila, pues los resultados con dos componentes y tres componentes es prácticamente el mismo.

En las figuras siguientes se muestran los ciclos histeréticos momento – curvatura de las articulaciones plásticas en la base de las pilas. Se presentan las gráficas de las pilas que resultaron más afectadas por la componente vertical y para los sismos 5, 8 y 10 de la tabla, que son los que produjeron los máximos efectos en las pilas.

Es interesante notar que los sismos 5, 8 y 10 tienen relaciones de aceleración máxima vertical / horizontal de 0.94, 0.84 y 0.88 respectivamente, mientras que la mayoría de los sismos seleccionados (Tabla 6.1.e) tienen relaciones mayores de 1.0. Lo anterior significa que la relación de aceleraciones máximas verticales / horizontales no es el único parámetro de interés cuando se busca el potencial destructivo del sismo por cargas verticales. Cabe recordar que todos los sismos fueron escalados para la misma aceleración máxima del terreno.

Las primeras ocho figuras corresponden a las graficas fuerza – deformación de las pilas del Puente A que disiparon energía inelástica a través de los ciclos histéricos. Se observan ciclos histeréticos estables y con incursiones en el intervalo inelástico muy limitados, lo que indica que la demanda no resultó excesiva en el las pilas y que el daño es moderado. Los ciclos histeréticos de las pilas

cortas (pilas 1 y 4) alcanzan curvaturas máximas del orden de tres veces la curvatura máxima que alcanzan las pilas altas (pilas 2 y 3).

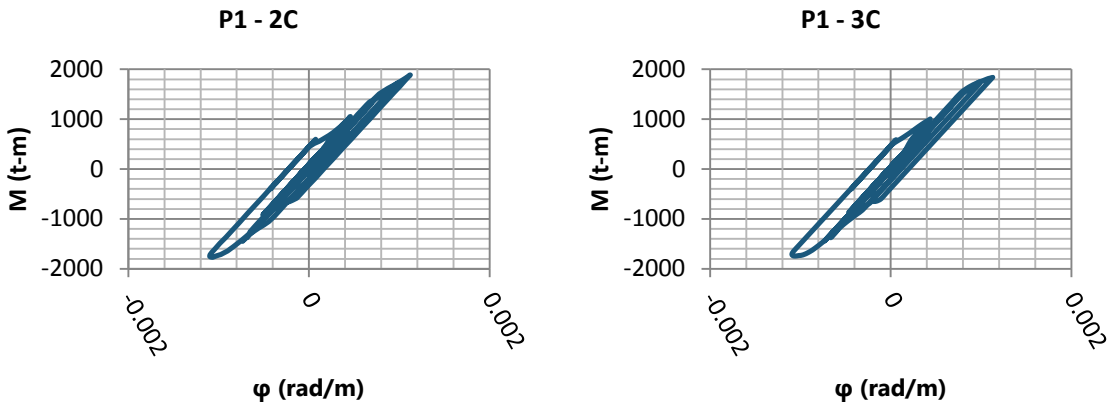


Figura 6.3.h *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 1, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

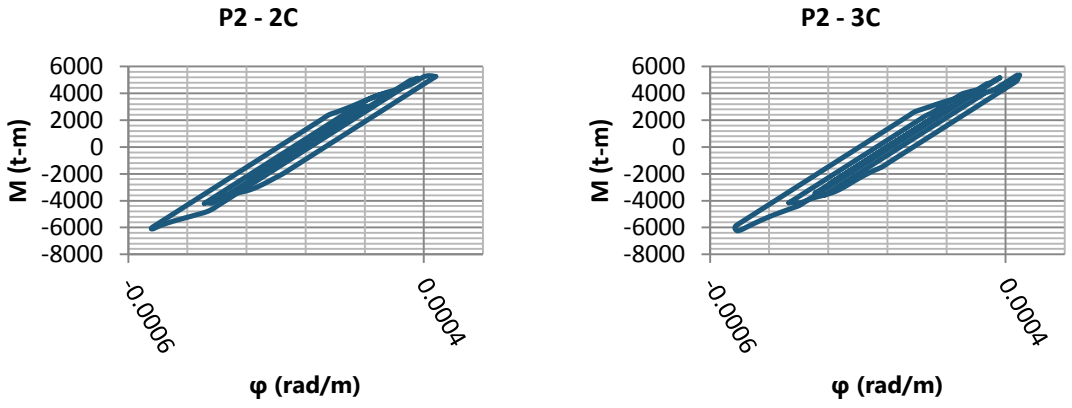


Figura 6.3.i *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 2, sismo, 5 para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

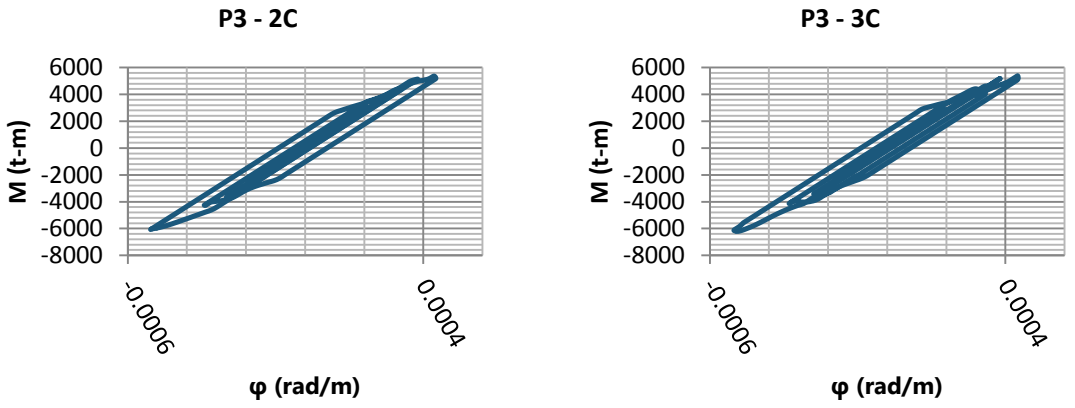


Figura 6.3.j *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

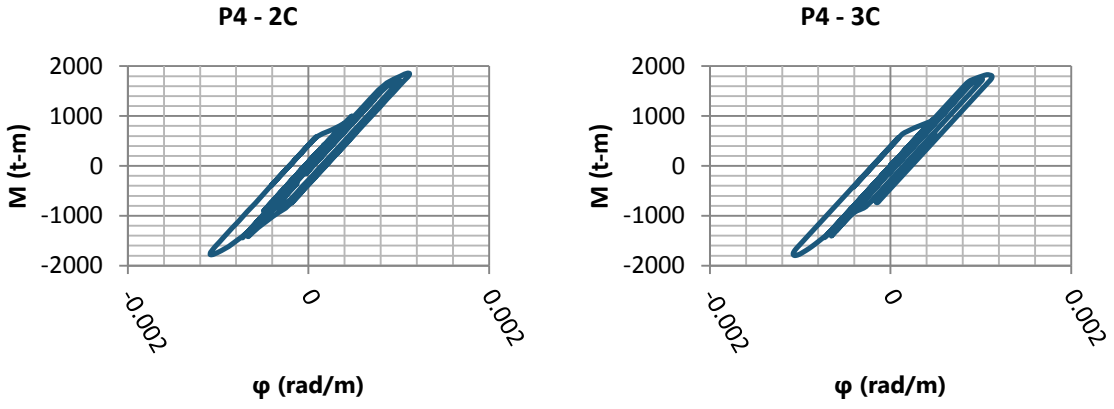


Figura 6.3.k *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 4, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

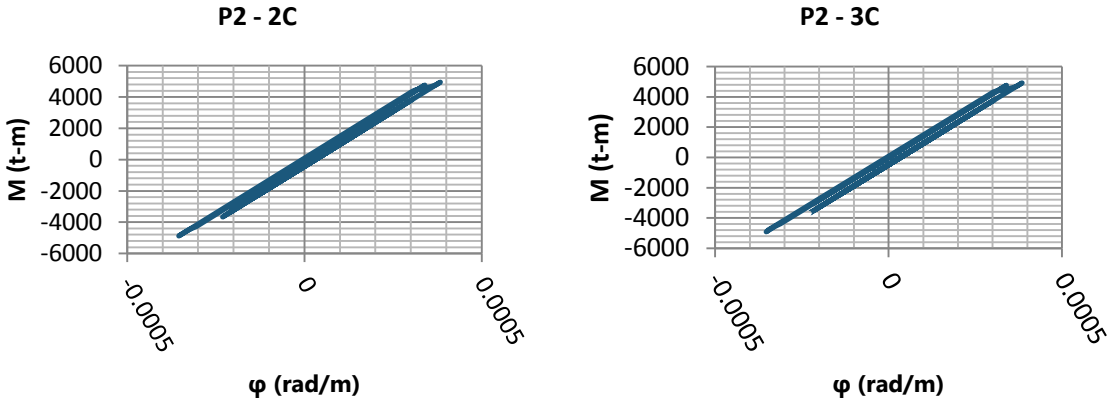


Figura 6.3.l *Ciclos histéricos del Puente A Terminado de la pila 2, sismo 8, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

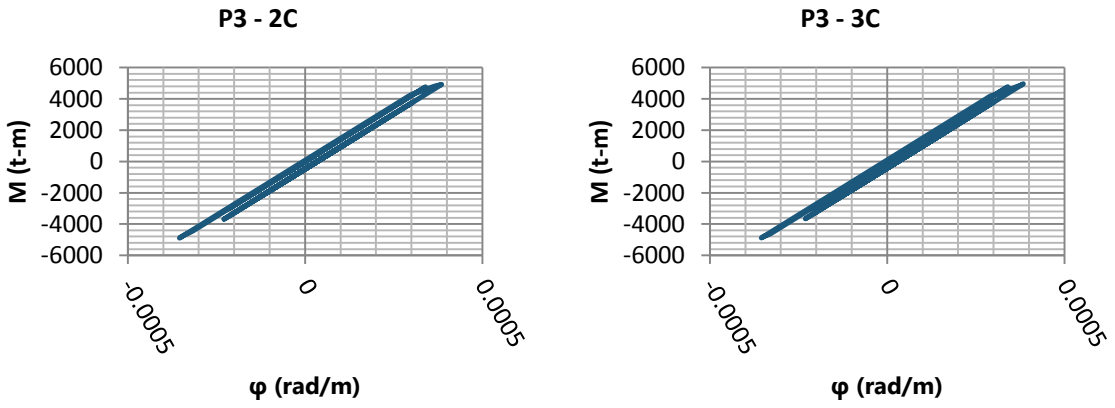


Figura 6.3.m *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 8, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

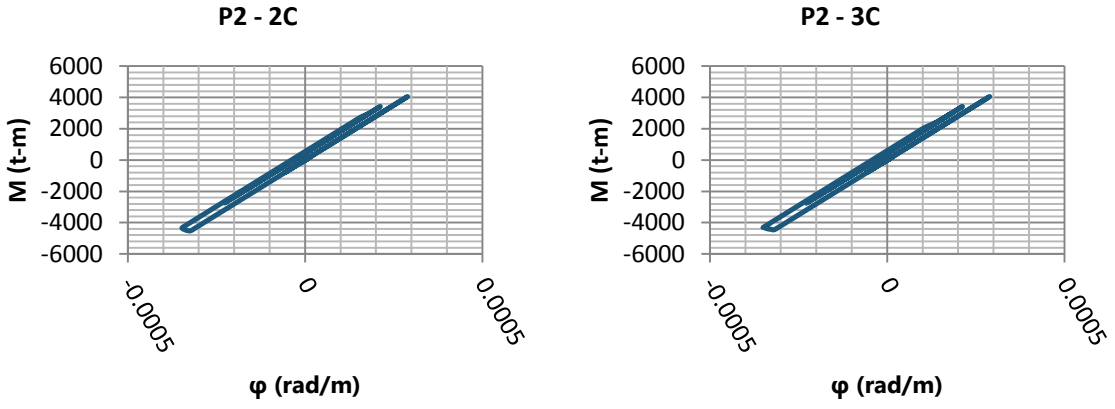


Figura 6.3.n *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 2, sismo 10, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

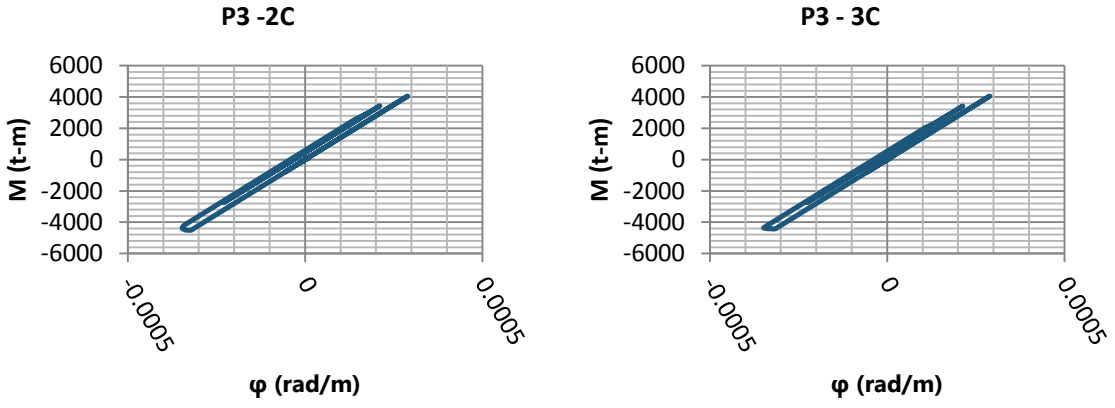


Figura 6.3.o *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 10, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

Las figuras restantes corresponden a las gráficas momento – curvatura de las pilas que sostuvieron un comportamiento elástico durante todo el tiempo que duró la acción sísmica. Se presenta la pila más afectada por la componente vertical para los sismos que mayor desplazamiento ocasionaron en cada uno de los puentes analizados. Los desplazamientos máximos en cada una de las gráficas serán comentados en el capítulo siguiente.

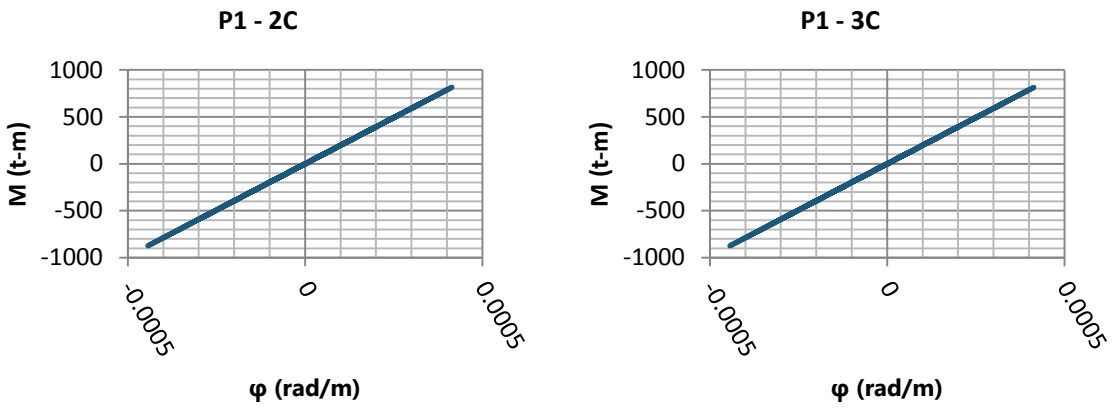


Figura 6.3.p *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1 del Puente A terminado, sismo 2, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

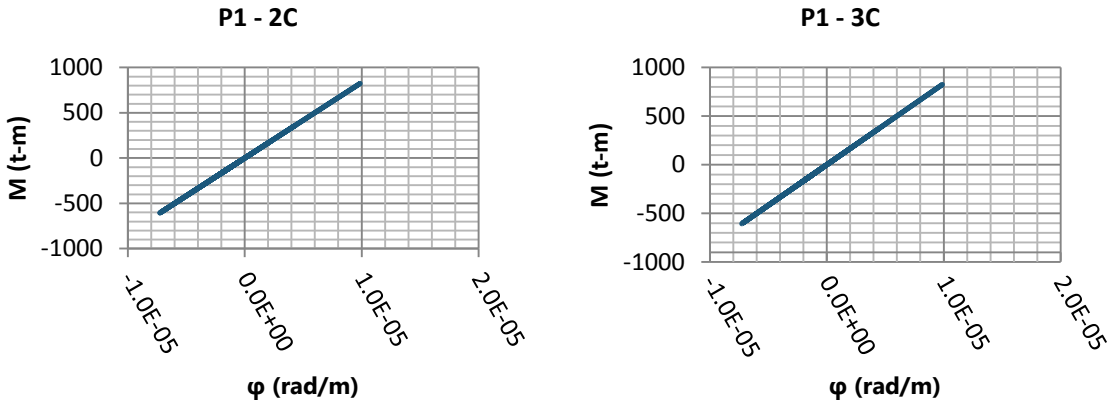


Figura 6.3.q *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1del Puente B etapa 2, sismo 7, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

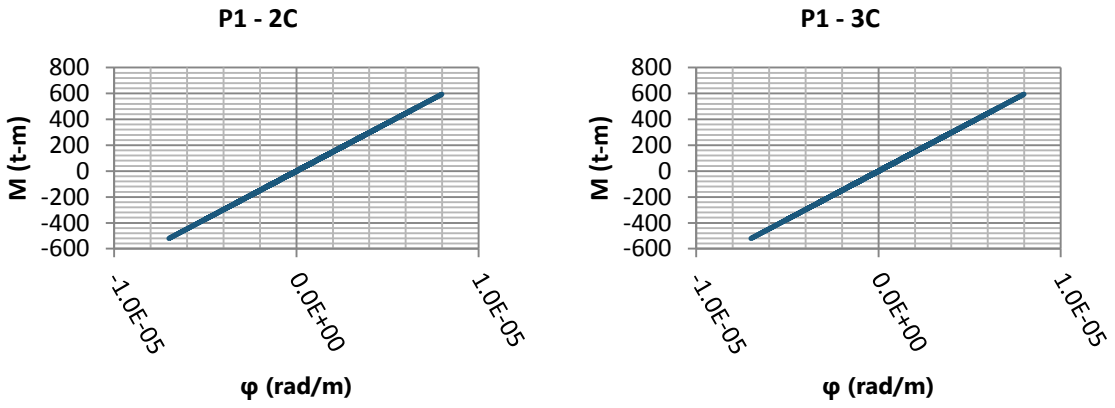


Figura 6.3.r *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes y tres componentes sísmicas.*

6.4. Análisis de los puentes terminados

En vista de que la etapa crítica de los puentes A y C resultó ser la del puente terminado, se hace un análisis para evaluar el efecto de la componente vertical, considerando las condiciones usuales de diseño para puentes ya construidos, es decir, se considera el peso total sobre el puente, incluyendo el asfalto, parapetos, barandales y banquetas. Además, se usará el sismo de diseño para un periodo de retorno correspondiente a 475 años, modificado por el factor de importancia de la estructura. Con estos dos cambios se repite el análisis para obtener los ciclos histeréticos en las pilas y los elementos mecánicos máximos.

En la Tabla 6.4.a se presentan las relaciones de la carga axial sobre las pilas de los puentes A y C. para el registro del sismo que mayores efectos tuvo en los análisis previos. Se observa que se produce un incremento de la carga axial de 44.49% en las pilas de mayor altura y de 31.64% en una de las pilas bajas. Esta diferencia en la carga axial si es significativa pues reduce la capacidad de deformación de los elementos dando origen a fallas menos dúctiles. Los efectos de segundo orden pueden llegar a ser importantes con el incremento de carga observado. En el Puente B, el incremento de la carga axial sobre las columnas es marginal y no parece tener una influencia importante en la respuesta del puente.

COCIENTES 3C/2C DE CARGA AXIAL EN ARTICULACIÓN				
Sismo	**P A T**			
	P1	P2	P3	P4
5	14.69%	42.03%	**44.49%**	31.64%
	P C T			
	P1	P2		
7	5.99%	2.95%		

Tabla 6.4.a *Relaciones 3C/2C de la fuerza axial resultante en la articulación.*

El conjunto de figuras siguientes muestran la historia en el tiempo de la carga axial de cada una de las pilas de los puentes A y C al considerar las condiciones para puente nuevo. Al igual que en el análisis anterior, en la misma figura se muestra el caso considerando dos componentes (color azul al frente) y tres componentes (color rojo al fondo).

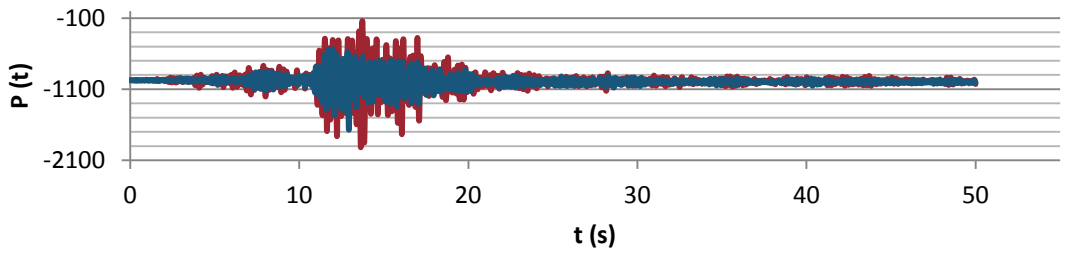


Figura 6.4.a *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.*

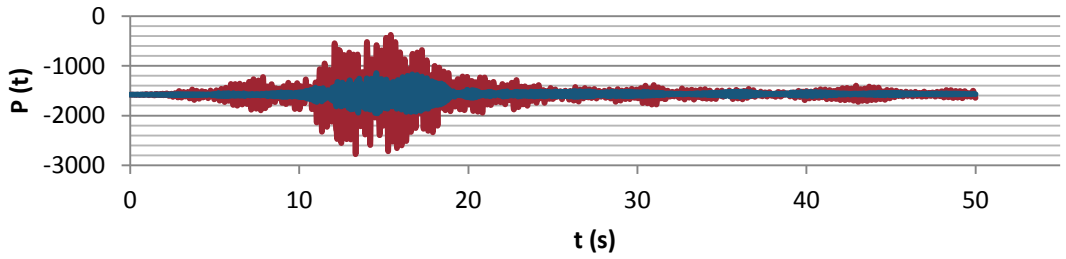


Figura 6.4.b *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.*

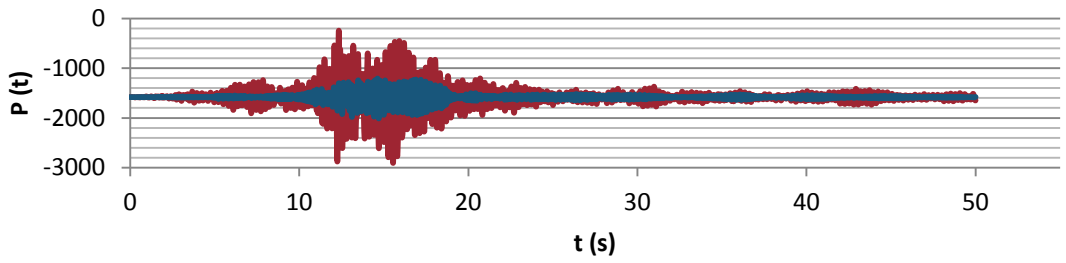


Figura 6.4.c *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 3 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.*

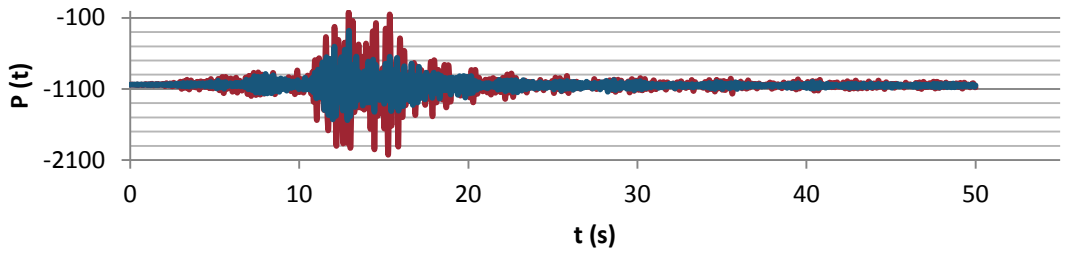


Figura 6.4.d *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 4 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.*

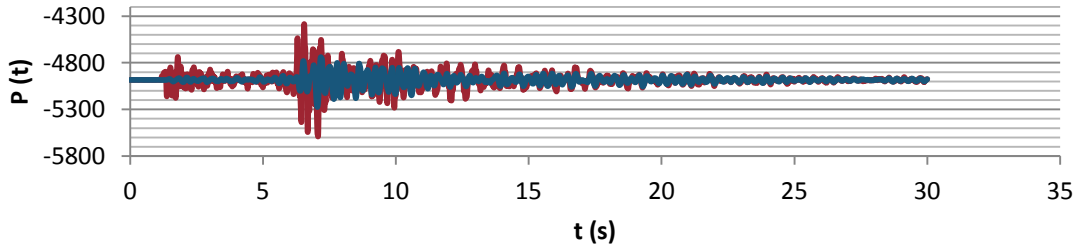


Figura 6.4.e *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.*

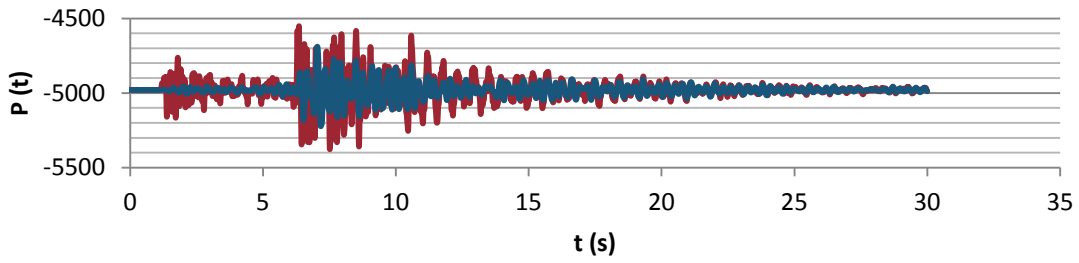


Figura 6.4.f *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.*

Se confirma la observación realizada en los análisis anteriores, en las que se observa que la carga axial que se produce cuando actúa la componente vertical, supera prácticamente en toda la historia de carga, a la máxima fuerza axial que se produce cuando no se considera esta componente.

Por lo que corresponde al momento máximo en la base de las columnas, se observa que en el Puente A, se llegan a momentos 10.3% mayores cuando se considera la componente vertical que si no se tiene en cuenta. En el caso del Puente B no existe prácticamente diferencia entre considerar dos o tres componentes en el análisis (ver Figura 6.4.b).

COCIENTES 3C/2C DE MOMENTOS MAXIMOS EN ARTICULACIÓN				
Sismo	**P A T**			
	P1	P2	P3	P4
5	0.10%	**10.33%**	4.77%	-0.49%
	P C T			
	P1	P2		
7	0.05%	0.02%		

Tabla 6.4.b *Relaciones 3C/2C del momento máximo en la articulación considerando condiciones para puente nuevo.*

Los siguientes ciclos histéricos corresponden a las pilas del Puente A terminado al ser analizados considerando la carga muerta total y el sismo de diseño correspondiente al periodo de retorno de un puente nuevo. El análisis se realizó utilizando el registro sísmico 5 pues fue el que tuvo mayor efecto sobre el puente en construcción.

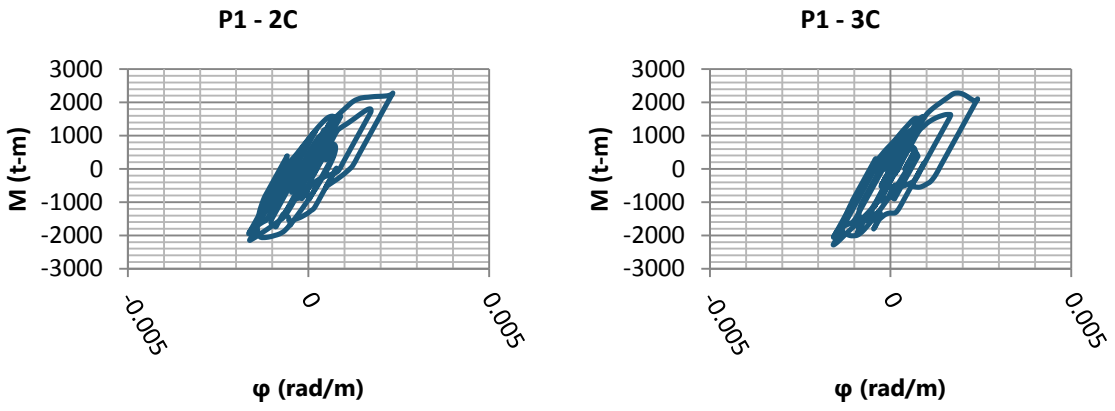


Figura 6.4.g *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 1, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo.*

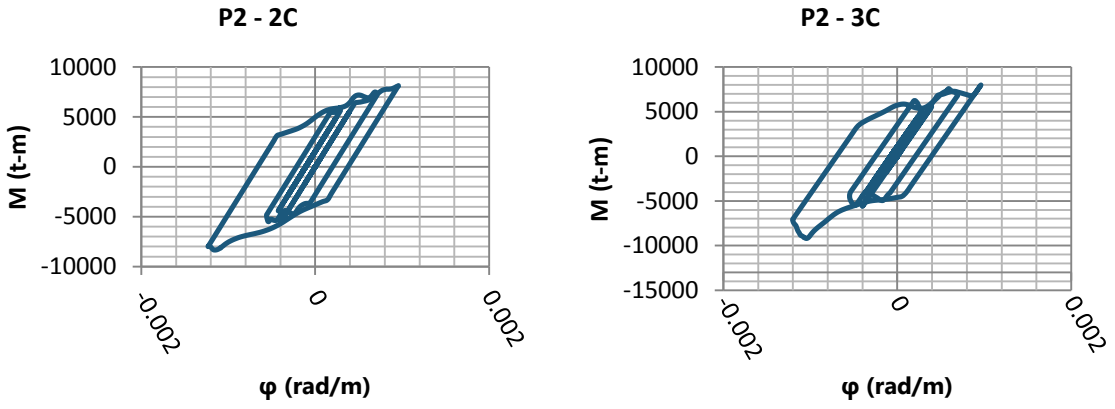


Figura 6.4.h *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 2, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo.*

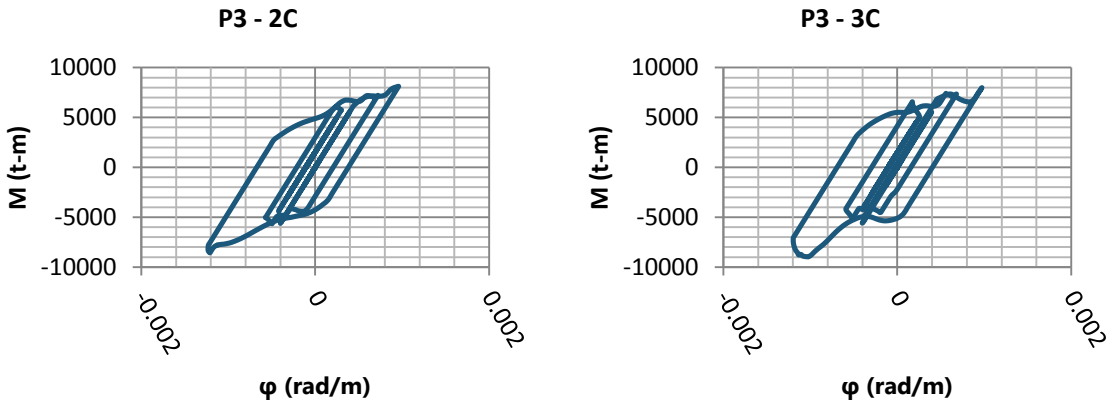


Figura 6.4.i *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo.*

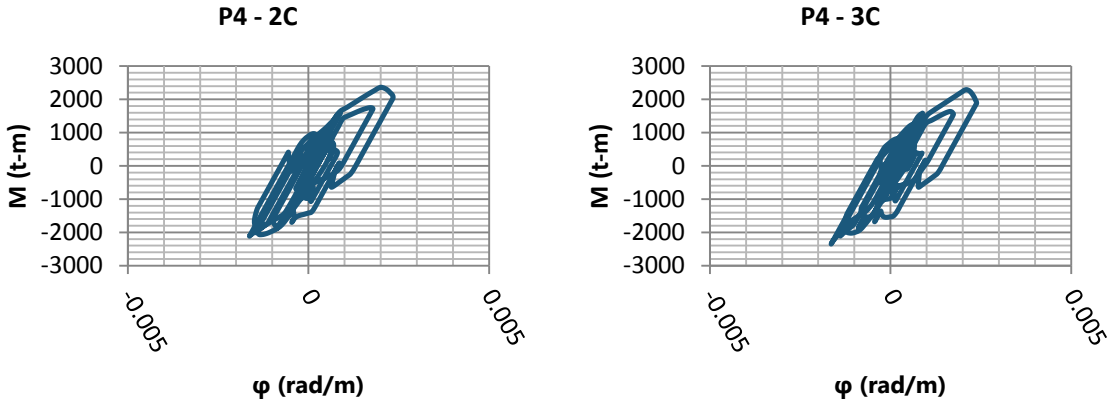


Figura 6.4.j *Ciclos histéricos del Puente A terminando de la pila 4, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo.*

Los ciclos histeréticos disipan mayor energía que en el puente en construcción, lo que significa un mayor daño en las pilas. Al igual que en el puente en construcción, las curvaturas máximas en las pilas cortas (pilas 1 y 4) son mayores que en las pilas altas (pilas 2 y 3), con valores aproximadamente del doble. Los momentos y curvaturas máximas en la pila son semejantes y la diferencia principal se observa nuevamente en la carga axial sobre la pila con los efectos negativos que ésta produce en elementos sometidos a flexocompresión.

El comportamiento de las pilas del Puente C terminado fue totalmente lineal al ser analizado con la carga muerta total y el sismo de diseño. En las siguientes figuras se puede observar este comportamiento cuando actúan dos componentes en forma simultánea y cuando actúan las tres componentes del sismo.

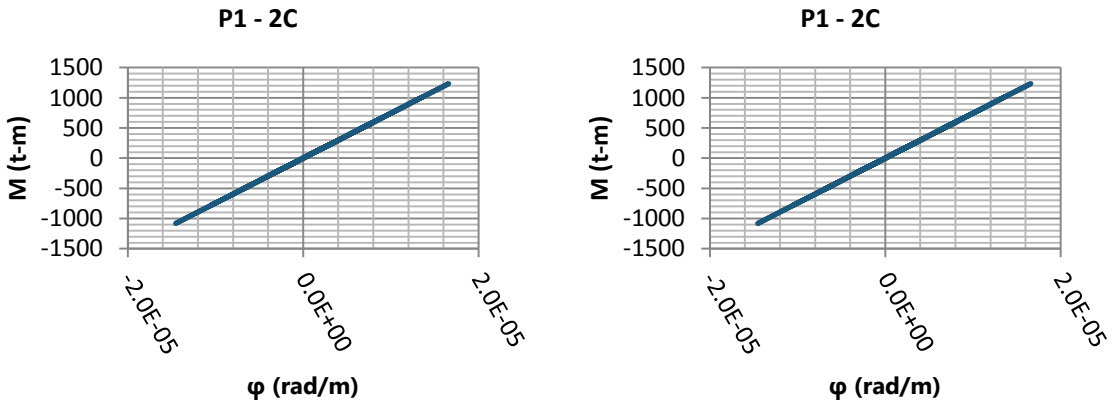


Figura 6.4.k *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo.*

Capítulo 7 Análisis de resultados

En el presente capítulo se determinan los efectos máximos que producen los registros sísmicos en los puentes estudiados en el capítulo anterior. Se inicia analizando los resultados de momentos máximos y cargas axiales en las articulaciones de las pilas de cada puente. Para ello, se consideraron dos índices de daño: el primero es únicamente la demanda de ductilidad de curvatura en las articulaciones plásticas de todas las pilas, y el segundo es la determinación del índice de daño de Park y Ang (1985), en las pilas que tuvieron un comportamiento inelástico, y a partir de dicho índice, la condición de daño esperado en las pilas.

- La ductilidad de curvatura se define como:

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_{max}}{\varphi_y}$$

donde:

$\varphi_{max} = curvatura\ maxima\ alcanzada$

$\varphi_y = curvatura\ alcanzada\ al\ llegar\ al\ esfuerzo\ de\ fluencia$

- El índice de daño de Park y Ang se define como:

$$D_e = \frac{\delta_{máx}}{\delta_u} + \frac{\beta}{F_y \delta_u} \int dE$$

donde:

$\delta_{máx} = desplazamiento\ maximo\ alcanzado\ bajo\ carga\ cíclica$

$\delta_u = desplazamiento\ ultimo\ alcanzado\ bajo\ carga\ monótona$

$\beta = parámetro\ no\ negativo\ (0 \leq \beta \geq 1)$

$F_y = fuerza\ de\ fluencia$

$dE = energía\ disipada\ en\ los\ ciclos\ de\ histéresis$

El parámetro β se obtiene con la expresión siguiente, y representa el ajuste de los datos experimentales realizados por Park y Ang para las cuatro variables que se mencionan tener mayor influencia en el daño de los elementos:

$$\beta = \left(-0.447 + 0.073\frac{l}{d} + 0.24n_0 + 0.314\rho_l\right)0.7^{\rho_w}$$

donde:

$l/d = \ claro\ de\ cortante$

$n_0 = fuerza\ axial\ normalizada$

$\rho_l = porcentaje\ de\ refuerzo\ longitudinal$

$\rho_w \ = porcentaje\ de\ refuerzo\ de\ confinamiento$

El índice de daño puede reescribirse en términos de la rotación en la articulación plástica que es donde efectivamente se produce el daño. El índice de daño queda entonces:

$$D_e = \frac{\theta_{máx}}{\theta_u} + \frac{\beta}{M_y\theta_u}\int dE$$

donde:

$\theta_{máx} = rotación\ maxima\ alcanzada\ bajo\ carga\ cíclica$

$\theta_u = rotación\ ultima\ alcanzada\ bajo\ carga\ monótona$

$\beta = parámetro\ no\ negativo\ (0 \leq \beta \geq 1)$

$M_y = momento\ de\ fluencia$

$dE = energía\ disipada\ en\ los\ ciclos\ de\ histéresis$

De acuerdo con (Williams and Sexsmith, 1995) el índice de daño puede asociarse a la condición de daño de los elementos. En la Tabla 7.1.a se presenta la relación entre D_e y cinco distintas condiciones de daño que van desde no daño hasta la falla del elemento.

D_e	Nivel de daño
0.00 – 0.10	Sin daño –pequeñas grietas localizadas
0.10 – 0.25	Daño ligero – agrietamiento leve
0.25 – 0.40	Daño moderado – agrietamiento severo
0.40 – 1.00	Daño severo – aplastamiento del hormigón, refuerzo expuesto
1.00 o más	Colapso

Tabla 7.1.a *Comportamiento del índice de daño de Park y Ang.*

7.1. Puente recto tipo viga (Puente A)

Como ya se ha mencionado, los momentos máximos en la articulación no tienen un aumento significativo al comparar los resultados sin y con la componente vertical del sismo. A pesar de ello, éste puente experimenta un comportamiento inelástico en las pilas cuando actúan tres de los diez sismos considerados en el análisis del capítulo anterior (sismo 5, 8 y 10 de la Tabla 6.1.e).

En la Tabla 7.1.b, se presenta la demanda de ductilidad de curvatura de las cuatro pilas del puente al ser analizado con las dos componentes horizontales. Las pilas 2 y 3 que son las más altas del puente, tienen valores de ductilidad mayor de 1.0 en los tres registros sísmicos. El sismo registrado en la estación Acapulco Centro Cultural el 25 de abril del 1989 (sismo 5), es el que produce mayor daño en la pila, sin embargo, la ductilidad máxima es de 1.46, por lo cual no se espera un daño importante en el elemento. En las pilas 1 y 4 que son las de menor altura, la ductilidad máxima es de 1.43 para el mismo sismo. Con los otros registros puede considerarse que en las pilas cortas no se excede produce daño.

DUCTILIDAD DE CURVATURA (μ_φ)				
Sismo	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**
5	1.4337	**1.4648**	1.4633	1.2838
8	1.0519	1.2359	1.213	1.054
10	1	1.0686	1.0858	1

Tabla 7.1.b *Ductilidad de curvatura* (μ_φ) *con 2C.*

En el caso en que actúan las tres componentes del sismo, los valores de ductilidad de curvatura se incrementan ligeramente.

DUCTILIDAD DE CURVATURA (μ_φ)				
Sismo	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**
5	1.4439	1.5181	**1.565**	1.3088
8	1.0472	1.219	1.1688	1.0629
10	1	1.1044	1.1078	1

Tabla 7.1.c *Ductilidad de curvatura* (μ_φ) *con 3C.*

Como se puede observar en las tablas anteriores, todas las columnas, a excepción de las dos altas (P2 y P3), analizadas con el registro sísmico de la estación Petacalco Subestación del 29 de diciembre de 1999 (sismo 8), tienen un aumento en la ductilidad. En la pila 3 se obtiene una curvatura máxima de 1.565, cuando se aplica el sismo de abril de 1989.

En la siguiente tabla se muestran los índices de daño (I_D) obtenidos para los mismos sismos y cuando actúan dos y tres componentes. Se puede observar que el índice de daño sufrido por las pilas 2 y 3 es menor de 0.107 en todos los sismos aplicados. De acuerdo con la Tabla 7.1.a, estas pilas no presentarían ningún daño. Por otro lado, las pilas cortas tienen índices de daño comprendidos entre 0.114 y 0.117, que sería clasificado como daño ligero, con un agrietamiento leve de acuerdo con la Tabla de 7.1.a. Es importante notar que las pilas que sufrieron más daño son las de menor altura las cuales son más rígidas y resultaron ser menos dúctiles. Esta última conclusión es contraria a la que se deriva del uso del índice de ductilidad como medida del daño, pues de acuerdo con la ductilidad de curvatura, las pilas más altas serían las que presentarían un daño mayor.

	P1		P2		P3		P4	
	2C	3C	2C	3C	2C	3C	2C	3C
5	0.171	0.171	0.104	0.106	0.103	0.107	0.172	**0.177**
8	0.114	0.116	0.065	0.065	0.065	0.065	0.114	0.115
10			0.059	0.060	0.060	0.059		

Tabla 7.1.d *Índices de daño (I_D) de Park y Ang.*

Debido a que la etapa crítica del Puente A resultó ser la etapa del puente terminado, se realizó un análisis considerando la carga muerta total y el sismo de diseño correspondiente a la vida útil de un puente nuevo. La ductilidad de curvatura que se muestra en la Tabla 7.1.d, corresponde a la obtenida con el registro sísmico que mayor efecto causó en los análisis anteriores (sismo de abril de 1989). Como se puede observar la ductilidad aumenta más de 50% en todas las pilas con relación al análisis anterior. La ductilidad de curvatura es de 3.187 al someter a la estructura a las dos componentes horizontales y de 3.275 cuando actúan las tres componentes.

DUCTILIDAD DE CURVATURA (μ_φ)				
	P1	P2	P3	P4
2C	2.9466	2.6941	2.7745	**3.1875**
3C	2.9971	**3.2753**	3.2135	3.0305

Tabla 7.1.e *Ductilidad de curvatura (μ_φ) con condiciones para puente nuevo.*

Con respecto al índice de daño, en la siguiente tabla se observa que la ductilidad máxima al considerar las tres componentes llega a ser de 0.875, el cual corresponde a daño severo según la tabla de comportamiento del índice de Park y Ang (Tabla 7.1.a). En caso de que la estructura se someta a sólo dos componentes, el índice es ligeramente menor y se llega al mismo nivel de daño. Nuevamente las pilas altas tienen un menor índice de daño, que se aproxima al daño moderado, en comparación con el daño severo de las pilas cortas. En cambio, la ductilidad utilizada como índice de daño proporciona valores semejantes en todas las pilas del puente.

	P1		P2		P3		P4	
	2C	3C	2C	3C	2C	3C	2C	3C
5	0.810	0.862	0.351	0.429	0.359	0.417	0.867	**0.875**

Tabla 7.1.f *Índices de daño de Park y Ang (I_D) con condiciones para puente nuevo.*

7.2. Puente curvo (Puente B) y puente voladizo balanceado (Puente C)

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se puede observar que el puente empujado curvo (ver Figura 6.3.b) es el más afectado por la componente vertical, llegando a tener un aumento de 36.87% en la carga axial sobre las columnas cuando se consideró el registro sísmico de la estación Petacalco Subestación del 29 de diciembre de 1999 (sismo 8, ver Tabla 6.1.e).

Sin embargo, en cuanto al momento máximo que se presenta en la base de la pila, el comportamiento es lineal.

Las pilas del puente balanceado se ven menos afectadas por la componente vertical del sismo. En este caso el tablero presentó incrementos más importantes en los esfuerzos.

Capítulo 8 Conclusiones

A partir del análisis de cien registros sísmicos obtenidos de la Base Mexicana de Sismos Fuertes, que comprendían tanto sismos superficiales como sismos de profundidad intermedia, se encontraron 39 eventos en los que el valor de la aceleración vertical superaba 2/3 de la aceleración horizontal máxima.

En el conjunto de registros sísmicos seleccionados, el valor máximo obtenido para la relación de V/H es de 2.53, más de tres veces el valor recomendado de 2/3. El registro anterior corresponde al registro de la estación Islas Agrarias (clave IAGS) del 15 de octubre de 1979 registrado en terreno blando. En cuanto a terreno rocoso, el valor máximo de la relación V/H es de 1.69, más de dos veces el valor propuesto por Newmark et al. de 2/3; éste registro corresponde al de la estación Xaltianguis del 02 de mayo de 1989.

Se verifico que la relación V/H es generalmente directamente proporcional con la magnitud del sismo e inversamente proporcional con la profundidad y con la distancia epicentral. Sin embargo, es importante señalar que dos eventos registrados a más de 50 km, dieron una relación V/H de 1.13 y 1.69.

En cuanto a los análisis lineales realizados, se puede concluir que las etapas más críticas para los cinco diferentes puentes es la etapa terminada (Tabla 5.5.a), a excepción del puente empujado curvo, en el que la etapa crítica es en la cual se encuentra el tablero apoyado sobre la primera pila del puente. En general, los elementos que resultaron más afectados fueron las pilas, solamente en el puente empujado curvo y en el puente atirantado, el tablero resultó ser el elemento más afectado por la componente vertical. Es importante notar que la etapa y sección más crítica del puente empujado curvo concuerdan con la etapa constructiva en la que sufrió el colapso del Puente San Cristóbal del estado de Chiapas.

PUENTE	ETAPA	SECCIÓN	ESFUERZO	VALOR
A	T	P2	Axial	1.4051
B	2	I2	Mmax	1.2209
C	T	P1	M2	1.5435
D	T	P1	Axial	1.1851
E	T	I2	Mmax	1.2866

Tabla 5.5.a *Casos más críticos de cada puente para la relación B.*

Otro elemento presente en el puente en arco y el puente atirantado es el elemento cable el cual resultó poco afectado por la componente vertical. El aumento más grande registrado fue de el 7.48% en la etapa constructiva dos del puente atirantado.

Con respecto a los análisis no lineales, se concluye que el puente empujado recto es el más afectado por la componente vertical, sin embargo como la etapa crítica de este puente es al finalizar el proceso constructivo, y el peso muerto considerando es el correspondiente a la etapa constructiva (sin asfalto, parapeto, etc.) solamente se obtuvo un daño ligero. Al ser considerada la totalidad de la carga muerta y el periodo de retorno para la vida útil de un puente nuevo, se presentan demandas de ductilidad de curvatura de hasta 3.27 en la base de las pilas.

El índice de daño de Park y Ang alcanzó valores de hasta 0.88 en las pilas cortas, correspondiente a un daño severo caracterizado por aplastamiento del concreto y acero de refuerzo expuesto, mientras que en las pilas altas el nivel de daño es moderado.

La carga axial se incrementó notablemente cuando se aplicó la componente vertical del sismo. En particular, la pila del puente curvo aumentó en 36.87% y las de los otros puentes llegaron a incrementarse en 32.71%. Estos incrementos reducen notablemente la capacidad de deformación de las pilas y por lo tanto el daño asociado puede incrementarse en forma importante.

Debe señalarse que los sismos que llevaron a los índices de daño más altos en las pilas no son los que tienen los mayores valores de la relación V/H, por lo que el potencial de daño no está asociado únicamente al valor de dicha relación.

Como conclusión general se puede decir que la peor etapa constructiva corresponde a la etapa terminada del puente empujado recto. Los índices de daño para el puente terminado y bajo las condiciones de diseño para un puente nuevo, dieron índices de daño asociados a un daño severo, por lo que resulta muy importante tener en cuenta el efecto de la carga vertical para este escenario sísmico. Por lo que respecta a la fuerza axial sobre las columnas, se observa un incremento significativo que reduce de forma importante la capacidad de deformación de estos elementos, especialmente en el puente curvo, por lo que también resulta una llamada de atención el efecto que la componente vertical tiene en la respuesta de este tipo de puentes.

Se considera necesario realizar más análisis con un mayor número de registros sísmicos y con diferentes geometrías de cada puente para llegar a conclusiones más generales.

Índice de figuras

Figura 2.1.a *Proceso de lanzamiento por incrementos sucesivos.* 6

Figura 2.1.b *Nariz de lanzamiento* 8

Figura 2.1.c *Apoyo deslizante* 9

Figura 2.1.d *Sistema de empujado* 10

Figura 2.1.e *Derrumbe del Puente San Cristóbal* 11

Figura 2.1.f *Elevación del Puente San Cristóbal* 11

Figura 2.1.g *Planta del Puente San Cristóbal* 12

Figura 2.1.h *Proceso constructivo voladizo balanceado* 14

Figura 2.1.i *Sección transversal típica para un puente de altura variable con claro de 93 m* 15

Figura 2.1.j *Configuración típica de cables de voladizo* 16

Figura 2.1.k *Configuración típica de cables de continuidad* 16

Figura 2.2.a *Puente de tablero superior* 17

Figura 2.2.b *Puente de tablero intermedio* 17

Figura 2.2.c *Puente de tablero inferior* 17

Figura 2.2.d *Puente Šibenik* 18

Figura 2.2.f *Colocación de dovelas con torres temporales* 19

Figura 2.2.g *Configuración antes del cierre del arco* 19

Figura 2.2.h *Cierre del arco* 20

Figura 2.2.i *Construcción de últimas pilas y terminación del tablero* 20

Figura 2.3.a *Puente Strömsund* 21

Figura 2.3.b *Cable cerrado* 22

Figura 2.3.c *Cable en espiral* 22

Figura 2.3.d *Sistema de anclaje* 22

Figura 2.3.e *Arreglo transversal de los tirantes* 23

Figura 2.3.f *Tipos de pilas* 24

Figura 2.3.g *Secciones transversales comunes del tablero* 25

Figura 2.3.h *Construcción de pila central* 26

Figura 2.3.i *Colocación de los primeros segmentos del tablero* 26

Figura 2.3.j *Levantamiento de un segmento de tablero* 27

Figura 2.3.k *Sistema de izaje renderizado* 27

Figura 2.3.l *Sistema de izaje* 28

Figura 2.3.m *Colocación de segmentos del tablero* 28

Figura 2.3.n *Puente atirantado terminado* 29

Figura 3.1.a *Relación PGA_V/PGA_H vs Distancia Epicentral (R)* 32

Figura 3.1.b *Aceleración del terreno en la historia del tiempo, registro Northridge-Arleta* 32

Figura 3.1.c *Dependencia de la magnitud en la relación espectral V/H a distancias de 1 y 20 km de la falla* 34

Figura 3.1.d *Dependencia de la magnitud en la relación espectral V/H a distancias de 1 y 20 km de la falla* 34

Figura 3.2.a *Ubicación en México de los sismos seleccionados* 38

Figura 3.2.b *Sa_V (T = 0.2 s) vs relación PGA_V/PGA_H de cada registro sísmico* 42

Figura 3.2.c *Sa_V (T = 1.5 s) vs relación PGA_V/PGA_H de cada registro sísmico* 42

Figura 3.2.d *Relación PGA_V/PGA_H vs profundidad de cada registro sísmico* 43

Figura 3.2.e *Relación PGA_V/PGA_H vs magnitud de cada registro sísmico* 43

Figura 3.2.f *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de cada registro sísmico* 44

Figura 3.2.g *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con $5.0 \leq M \leq 5.4$* 45

Figura 3.2.h *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con $M \geq 5.5$* 45

Figura 3.2.i *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con $5.0 \leq M \leq 5.9$* 46

Figura 3.2.j *Relación PGA_V/PGA_H vs distancia epicentral de registros sísmicos con $M \geq 6.0$* 46

Figura 3.2.k *Relación Sa/PGA vs Periodo* 47

Figura 4.1.a *Dimensiones de puente recto tipo viga* 49

Figura 4.1.b *Dimensiones de sección transversal* 51

Figura 4.1.c *Dimensiones de la nariz de lanzamiento en planta* 51

Figura 4.1.d *Dimensiones de la nariz de lanzamiento en corte longitudinal* 52

- ***Puente A – E1***

Figura 4.1.e *Modo 1: V – 1.72 s* 53

Figura 4.1.f *Modo 2: T – 1.63 s* 53

Figura 4.1.g *Modo 8: $A_{V\text{-}A}$ – 0.21 s* 53

Figura 4.1.h *Modo 9: $A_{A\text{-}V}$ – 0.16 s* 53

- ***Puente A – E2***

Figura 4.1.i *Modo 1: T – 1.89 s* 53

Figura 4.1.j *Modo 2: V – 1.73 s* *53*

Figura 4.1.k *Modo 11: V – 0.24 s* *54*

Figura 4.1.l *Modo 12: $A_{V\text{-}A}$ – 0.22 s* *54*

- ***Puente A – E3***

Figura 4.1.m *Modo 1: T – 2.10 s* *54*

Figura 4.1.n *Modo 2: V – 1.73 s* *54*

Figura 4.1.o *Modo 11: V – 0.37 s* *54*

Figura 4.1.p *Modo 12: V – 0.28 s* *54*

- ***Puente A – T***

Figura 4.1.q *Modo 1: T – 1.45 s* *55*

Figura 4.1.r *Modo 11: V – 0.3 s* *55*

Figura 4.1.s *Modo 12: V – 0.31 s* *55*

Figura 4.1.t *Partes analizadas del Puente A, etapa 1* *57*

Figura 4.1.u *Partes analizadas del Puente A, etapa 2* *58*

Figura 4.1.v *Partes analizadas del Puente A, etapa 3* *59*

Figura 4.1.w *Partes analizadas del Puente A terminado* *61*

Figura 4.2.a *Puente curvo en planta* *65*

Figura 4.2.b *Sección transversal del tablero del puente curvo* *65*

- ***Puente B – E1***

Figura 4.2.c *Modo 1: V – 1.29 s* *66*

Figura 4.2.d *Modo 2: T – 0.74 s* *66*

Figura 4.2.e *Modo 3: Tor. – 0.25 s* *66*

Figura 4.2.f *Modo 4: V – 0.20 s* *66*

- ***Puente B – E2***

Figura 4.2.g *Modo 2: T – 1.19 s* *66*

Figura 4.2.h *Modo 5: V – 0.35 s* *66*

Figura 4.2.i *Modo 7: Tor. – 0.24 s* *67*

Figura 4.2.j *Modo 8: Tor. – 0.20 s* *67*

- ***Puente B – E3***

Figura 4.2.k *Modo 1: T – 1.75 s* *67*

Figura 4.2.l *Modo 4: V – 0.70 s* 67

Figura 4.2.m *Modo 8: Tor. – 0.25 s* 67

Figura 4.2.n *Modo 9: V – 0.16 s* 67

- ***Puente B – E4***

Figura 4.2.o *Modo 1: T – 3.60 s* 68

Figura 4.2.p *Modo 2: V – 2.09 s* 68

Figura 4.2.q *Modo 10: T – 0.20 s* 68

Figura 4.2.r *Modo 11: V – 0.16 s* 68

- ***Puente B – T***

Figura 4.2.s *Modo 3: V – 1.3 s* 69

Figura 4.2.u *Modo 11: V – 0.39 s* 69

Figura 4.2.t *Modo 6: T – 0.78 s* 69

Figura 4.2.v *Modo 12: V – 0.36 s* 69

Figura 4.2.w *Partes analizadas del Puente B, etapa 1* 70

Figura 4.2.x *Partes analizadas del Puente B, etapa 2* 70

Figura 4.2.y *Partes analizadas del Puente B, etapa 3* 72

Figura 4.2.z *Partes analizadas del Puente B, etapa 4* 73

Figura 4.2.aa *Partes analizadas del Puente B terminado* 74

Figura 4.3.a *Dimensiones de la sección transversal del puente voladizo balanceado (m)* 78

Figura 4.3.b *Espesores de la sección transversal del puente voladizo balanceado (m)* 78

- ***Puente C – E1***

Figura 4.3.c *Modo 2: T – 1.85 s* 78

Figura 4.3.d *Modo 4: V – 0.48 s* 78

Figura 4.3.e *Modo 6:* $A_{A\text{-}V}$ *– 0.17 s* 79

Figura 4.3.f *Modo 7: V – 0.17 s* 79

- ***Puente C – E2***

Figura 4.3.g *Modo 3: T – 2.4 s* 79

Figura 4.3.h *Modo 5: V – 0.55 s* 79

Figura 4.3.i *Modo 8: V – 0.21 s* 79

Figura 4.3.j *Modo 9: V – 0.16 s* 79

- ***Puente C – E3***

Figura 4.3.k *Modo 3: T – 2.80 s* *80*

Figura 4.3.l *Modo 5: V – 1.15 s* *80*

Figura 4.3.m *Modo 11: Tor. – 0.21 s* *80*

Figura 4.3.n *Modo 12: Tor. – 0.20 s* *80*

- ***Puente C – E4***

Figura 4.3.o *Modo 1: T – 2.78 s* *80*

Figura 4.3.p *Modo 2: V – 1.54 s* *80*

Figura 4.3.q *Modo 10: Tor. – 0.21 s* *81*

Figura 4.3.r *Modo 11: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.1 s* *81*

- ***Puente C – T***

Figura 4.3.s *Modo 1: T – 2.33 s* *81*

Figura 4.3.t *Modo 3: V – 1.26 s* *81*

Figura 4.3.u *Modo 11: Tor. – 0.29 s* *81*

Figura 4.3.v *Modo 12: V – 0.28 s* *81*

Figura 4.3.w *Pila vista en planta, posición de nodos analizados (en rojo)* *82*

Figura 4.3.x *Partes analizadas del Puente C, etapa 1* *82*

Figura 4.3.y *Partes analizadas del Puente C, etapa 2* *84*

Figura 4.3.z *Partes analizadas del Puente C, etapa 3* *86*

Figura 4.3.aa *Partes analizadas del Puente C, etapa 4* *88*

Figura 4.3.ab *Partes analizadas del Puente C terminado* *90*

Figura 4.4.a *Dimensiones de arco* *93*

Figura 4.4.b *Segmento de arco* *93*

Figura 4.4.c *Dimensiones de la sección transversal del arco* *93*

- ***Puente D – E1***

Figura 4.4.d *Modo 1: T – 1.70 s* *94*

Figura 4.4.e *Modo 2: V – 0.50 s* *94*

Figura 4.4.f *Modo 11: V – 0.22 s* *95*

Figura 4.4.g *Modo 12: V – 0.22 s* *95*

- ***Puente D – E2***

Figura 4.4.h *Modo 1: T – 1.70 s* 95

Figura 4.4.i *Modo 2: V – 0.63 s* 95

Figura 4.4.j *Modo 11: Tor. – 0.22 s* 95

Figura 4.4.k *Modo 12: V – 0.22 s* 95

- ***Puente D – E3***

Figura 4.4.l *Modo 1: T – 1.70 s* 96

Figura 4.4.m *Modo 2: V – 0.79 s* 96

Figura 4.4.n *Modo 11: $A_{A\text{-}V}$ – 0.25 s* 96

Figura 4.4.o *Modo 12: Tor. – 0.23 s* 96

- ***Puente D – E4***

Figura 4.4.p *Modo 1: T – 1.77 s* 96

Figura 4.4.r *Modo 11: $A_{Tor.\text{-}T}$ – 0.30 s* 96

Figura 4.4.q *Modo 3: V – 1.23 s* 97

Figura 4.4.s *Modo 12: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.28 s* 97

- ***Puente D – T***

Figura 4.4.t *Modo 1: T – 1.91 s* 97

Figura 4.4.u *Modo 3: V – 1.05 s* 97

Figura 4.4.v *Modo 11: Tor. – 0.51 s* 97

Figura 4.4.w *Modo 12: T – 0.50 s* 97

Figura 4.4.x *Partes analizadas del Puente D, etapa 1* 98

Figura 4.4.y *Partes analizadas del Puente D, etapa 2* 99

Figura 4.4.z *Partes analizadas del Puente D, etapa 3* 101

Figura 4.4.aa *Partes analizadas del Puente D, etapa 4* 103

Figura 4.4.ab *Partes analizadas del Puente D terminado* 105

Figura 4.5.a *Dimensiones de claros del puente atirantado* 108

Figura 4.5.b *Dimensiones del tablero del puente atirantado* 109

Figura 4.5.c *Dimensiones de pila del puente atirantado* 110

- ***Puente E – E1***

Figura 4.5.d *Modo 4: T – 1.40 s* 111

Figura 4.5.e *Modo 8: V – 0.64 s* *111*

Figura 4.5.f *Modo 11: Tor. – 0.40 s* *111*

Figura 4.5.g *Modo 12: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.37 s* *111*

- ***Puente E – E2***

Figura 4.5.h *Modo 1: V – 1.63 s* *112*

Figura 4.5.i *Modo2: T – 1.48 s* *112*

Figura 4.5.j *Modo 11: Tor. – 0.38 s* *112*

Figura 4.5.k *Modo 12: V – 0.35 s* *112*

- ***Puente E – E3***

Figura 4.5.l *Modo 1: T – 2.20 s* *113*

Figura 4.5.m *Modo 2: V – 1.65 s* *113*

Figura 4.5.n *Modo 11: V – 0.44 s* *113*

Figura 4.5.o *Modo 12: $A_{T\text{-}Tor.}$ – 0.37 s* *113*

- ***Puente E – E4***

Figura 4.5.p *Modo 1: T – 3.25 s* *113*

Figura 4.5.q *Modo 2: V – 1.85 s* *113*

Figura 4.5.r *Modo 11: T – 0.49 s* *114*

Figura 4.5.s *Modo 12: V – 0.47 s* *114*

- ***Puente E – E5***

Figura 4.5.t *Modo 1: T – 4.24 s* *114*

Figura 4.5.u *Modo 2: V – 2.03 s* *114*

Figura 4.5.v *Modo 11: Tor. – 0.55 s* *114*

Figura 4.5.w *Modo 12: Tor. – 0.46 s* *114*

- ***Puente E – T***

Figura 4.5.x *Modo 1: T – 4.36 s* *115*

Figura 4.5.y *Modo 2: V – 2.10 s* *115*

Figura 4.5.z *Modo 11: V – 0.81 s* *115*

Figura 4.5.aa *Modo 12: T – 0.79 s* *115*

Figura 4.5.ab *Partes analizadas del Puente E, etapa 1* *116*

Figura 4.5.ac *Partes analizadas del Puente E, etapa 2* *119*

Figura 4.5.ad *Partes analizadas del Puente E, etapa 3* *123*

Figura 4.5.ae *Partes analizadas del Puente E, etapa 4* *128*

Figura 4.5.af *Partes analizadas del Puente E, etapa 5* *133*

Figura 4.5.ag *Partes analizadas del Puente E terminado* *140*

Figura 5.1.a *Partes analizadas del Puente A, etapa 1* *149*

Figura 5.1.b *Partes analizadas del Puente A, etapa 2* *149*

Figura 5.1.c *Partes analizadas del Puente A, etapa 3* *150*

Figura 5.1.d *Partes analizadas del Puente A terminado* *150*

Figura 5.2.a *Partes analizadas del Puente B, etapa 1* *151*

Figura 5.2.b *Partes analizadas del Puente B, etapa 2* *151*

Figura 5.2.c *Partes analizadas del Puente B, etapa 3* *152*

Figura 5.2.d *Partes analizadas del Puente B, etapa 4* *152*

Figura 5.2.e *Partes analizadas del Puente B terminado* *153*

Figura 5.3.a *Partes analizadas del Puente C, etapa 1* *153*

Figura 5.3.b *Partes analizadas del Puente C, etapa 2* *154*

Figura 5.3.c *Partes analizadas del Puente C, etapa 3* *154*

Figura 5.3.d *Partes analizadas del Puente C, etapa 4* *155*

Figura 5.3.e *Partes analizadas del Puente C terminado* *155*

Figura 5.4.a *Partes analizadas del Puente D, etapa 1* *156*

Figura 5.4.b *Partes analizadas del Puente D, etapa 2* *156*

Figura 5.4.c *Partes analizadas del Puente D, etapa 3* *157*

Figura 5.4.d *Partes analizadas del Puente D, etapa 4* *157*

Figura 5.4.e *Partes analizadas del Puente D, etapa 5* *158*

Figura 5.5.a *Partes analizadas del Puente E, etapa 1* *158*

Figura 5.5.b *Partes analizadas del Puente E, etapa 2* *159*

Figura 5.5.c *Partes analizadas del Puente E, etapa 3* *159*

Figura 5.5.d *Partes analizadas del Puente E, etapa 4* *160*

Figura 5.5.e *Partes analizadas del Puente E, etapa 5* *160*

Figura 5.5.f *Partes analizadas del Puente E terminado* *161*

Figura 6.2.a *Esquema de pilas modeladas mediante dos elementos* *166*

Figura 6.2.b *Puente C terminado* *166*

Figura 6.2.c *Configuración del armado de las pilas de mayor altura (izq.) y las de menor altura (der.) del Puente A terminado* 167

Figura 6.2.d *Diagrama de interacción de la pilas de mayor altura del Puente A terminado* 167

Figura 6.2.e *Diagrama Momento – Curvatura de las pilas de mayor altura del Puente A terminado* 168

Figura 6.2.f *Diagrama de interacción de las pilas de menor altura del Puente A terminado* 168

Figura 6.2.g *Diagrama Momento – Curvatura de la pilas de menor altura del Puente A terminado* 169

Figura 6.2.h *Diagrama de interacción de las pilas de menor altura del Puente A terminado con condiciones para puente nuevo* 169

Figura 6.2.i *Diagrama Momento – Curvatura de la pilas de menor altura del Puente A terminado condiciones para puente nuevo* 170

Figura 6.2.j *Diagrama de interacción de las pilas de mayor altura del Puente A terminado con condiciones para puente nuevo* 170

Figura 6.2.k *Diagrama Momento – Curvatura de la pilas de mayor altura del Puente A terminado con condiciones para puente nuevo* 171

Figura 6.2.l *Puente B, etapa 2* 171

Figura 6.2.m *Configuración del armado de la pila del Puente B, etapa 2* 172

Figura 6.2.n *Diagrama de interacción a 0° de la pila del Puente B, etapa 2* 172

Figura 6.2.o *Diagrama Momento – Curvatura a 0° de la pila del Puente B, etapa 2* 172

Figura 6.2.p *Diagrama de interacción a 90° de la pila del Puente B, etapa 2* 173

Figura 6.2.q *Diagrama Momento – Curvatura a 90° de la pila del Puente B, etapa 2* 173

Figura 6.2.r *Puente C terminado* 173

Figura 6.2.s *Configuración del armado de la pilad del Puente C terminado* 174

Figura 6.2.t *Diagrama de interacción de la pila del Puente C terminado* 174

Figura 6.2.u *Diagrama Momento – Curvatura de la pila del Puente C terminado* 175

Figura 6.2.v *Diagrama de interacción de la pila del Puente C terminado con condiciones para puente nuevo* 175

Figura 6.2.w *Diagrama Momento – Curvatura de la pila del Puente C terminado con condiciones para puente nuevo* 176

Figura 6.3.a *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 177

Figura 6.3.b *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 178

Figura 6.3.c *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 3 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 178

Figura 6.3.d *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 4 del Puente A terminado, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 178

Figura 6.3.e *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente B etapa 2, sismo 8, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 179

Figura 6.3.f *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente C terminado, sismo 10, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 179

Figura 6.3.g *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente C terminado, sismo 10, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo)* 179

Figura 6.3.h *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 1, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 181

Figura 6.3.i *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 2, sismo, 5 para dos componentes y tres componentes sísmicas* 181

Figura 6.3.j *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 182

Figura 6.3.k *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 4, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 182

Figura 6.3.l *Ciclos histéricos del Puente A Terminado de la pila 2, sismo 8, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 182

Figura 6.3.m *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 8, para dos componentes y tres componentes sísmicas*....183

Figura 6.3.n *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 2, sismo 10, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 183

Figura 6.3.o *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 10, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 183

Figura 6.3.p *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1 del Puente A terminado, sismo 2, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 184

Figura 6.3.q *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1del Puente B etapa 2, sismo 7, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 184

Figura 6.3.r *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes y tres componentes sísmicas* 185

Figura 6.4.a *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo*....186

Figura 6.4.b *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo*....186

Figura 6.4.c *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 3 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo*....187

Figura 6.4.d *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 4 del Puente A terminado, sismo 5, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo*....187

Figura 6.4.e *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 1 del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo.....187*

Figura 6.4.f *Historia en el tiempo de la carga axial – pila 2 del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes (color azul) y tres componentes sísmicas (color rojo) con condiciones para puente nuevo 188*

Figura 6.4.g *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 1, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo 189*

Figura 6.4.h *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 2, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo 189*

Figura 6.4.i *Ciclos histéricos del Puente A terminado de la pila 3, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones de puente nuevo.....190*

Figura 6.4.j *Ciclos histéricos del Puente A terminando de la pila 4, sismo 5, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo 190*

Figura 6.4.k *Diagrama esfuerzo-deformación de la pila 1del Puente C terminado, sismo 7, para dos componentes y tres componentes sísmicas con condiciones para puente nuevo.....191*

Índice de tablas

Tabla 3.1.a *Cociente V/H de sismos importantes* *31*

Tabla 3.1.b *Cocientes de aceleración vertical a horizontal propuestos* *31*

Tabla 3.1.c *Resumen comparativo de las consideraciones reglamentarias para la componente vertical sísmica en código sísmicos mundiales* *36*

Tabla 3.2.a *Datos de los 100 registros sísmicos seleccionados* *41*

Tabla 3.2.b *Información recopilada de los registros seleccionados de la Base Mexicana de Sismos Fuertes* *41*

Tabla 4.1.a *Resultados de elementos en tablero del Puente A, etapa 1* *58*

Tabla 4.1.b *Resultados de la pila 1 del Puente A, etapa 1* *58*

Tabla 4.1.c *Resultados de elementos en tablero del Puente A, etapa 2* *59*

Tabla 4.1.d *Resultados de la pila 1 del Puente A, etapa 2* *59*

Tabla 4.1.e *Resultados de la pila 2 del Puente A, etapa 2* *59*

Tabla 4.1.f *Resultados de elementos en tablero del Puente A, etapa 3* *60*

Tabla 4.1.g *Resultados de la pila 1 del Puente A, etapa 3* *60*

Tabla 4.1.h *Resultados de la Pila 2 del Puente A, Etapa 3* *60*

Tabla 4.1.i *Resultados de la pila 3 del Puente A, etapa 3* *61*

Tabla 4.1.j *Resultados de elementos en tablero del Puente A terminado* *62*

Tabla 4.1.k *Resultados de la pila 1 del Puente A terminado* *62*

Tabla 4.1.l *Resultados de la pila 2 del Puente A terminado* *62*

Tabla 4.1.m *Resultados de la pila 3 del Puente A terminado* *62*

Tabla 4.1.n *Resultados de la pila 4 del Puente A terminado* *63*

Tabla 4.1.o *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente A* *63*

Tabla 4.1.p *Resultados máximos de las pilas del Puente A* *64*

Tabla 4.2.a *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 1* *70*

Tabla 4.2.b *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 2* *71*

Tabla 4.2.c *Resultados de la pila 1 del Puente B, etapa 2* *71*

Tabla 4.2.d *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 3* *72*

Tabla 4.2.e *Resultados de la pila 1 del Puente B, etapa 3* *73*

Tabla 4.2.f *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 4* *74*

Tabla 4.2.g *Resultados de la pila 1 del Puente B, etapa 4* *74*

Tabla 4.2.h *Resultados de elementos en tablero del Puente B, etapa 2* *75*

Tabla 4.2.i *Resultados de la pila 1 del Puente B terminado* *76*

Tabla 4.2.j *Resultados de la pila 2 del Puente B terminado* *76*

Tabla 4.2.k *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente B* *76*

Tabla 4.2.l *Resultados máximos de las pilas del Puente B* *77*

Tabla 4.3.a *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 1* *83*

Tabla 4.3.b *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 1* *83*

Tabla 4.3.c *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 2* *84*

Tabla 4.3.d *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 2* *86*

Tabla 4.3.e *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 3* *87*

Tabla 4.3.f *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 3* *88*

Tabla 4.3.g *Resultados de elementos en tablero del Puente C, etapa 4* *89*

Tabla 4.3.h *Resultados de la pila 1 del Puente C, etapa 4* *90*

Tabla 4.3.i *Resultados de elementos en tablero del Puente C terminado* *91*

Tabla 4.3.j *Resultados de la pila 1 del Puente C terminado* *91*

Tabla 4.3.k *Resultados de elementos en tablero del Puente C terminado* *92*

Tabla 4.3.l *Resultados de la pila 1 del Puente C terminado* *92*

Tabla 4.4.a *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 1* *98*

Tabla 4.4.b *Resultados de cables del Puente D, etapa 1* *99*

Tabla 4.4.c *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 1* *99*

Tabla 4.4.d *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 2* *100*

Tabla 4.4.e *Resultados de cables del Puente D, etapa 2* *100*

Tabla 4.4.f *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 2* 101

Tabla 4.4.g *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 3* *102*

Tabla 4.4.h *Resultados de cables del Puente D, etapa 3* *102*

Tabla 4.4.i *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 3* *102*

Tabla 4.4.j *Resultados de elementos en tablero del Puente D, etapa 4* *104*

Tabla 4.4.k *Resultados de cables del Puente D, etapa 4* *104*

Tabla 4.4.l *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D, etapa 4* *105*

Tabla 4.4.m *Resultados de elementos en tablero del Puente D terminado* *106*

Tabla 4.4.n *Resultados de la pila temporal y pila 1 del Puente D terminado* *107*

Tabla 4.4.o *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente D*.....107

Tabla 4.4.p *Resultados máximos de cables del Puente D* 107

Tabla 4.4.q *Resultados máximos de pilas del Puente D* 108

Tabla 4.5.a *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 1* 117

Tabla 4.5.b *Resultados de cables del Puente E, etapa 1* 118

Tabla 4.5.c *Resultados de desplazamientos en tablero del Puente E, etapa 1*.....118

Tabla 4.5.d *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 1* 118

Tabla 4.5.e *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 2*.....120

Tabla 4.5.f *Resultados de cables del Puente E, etapa 2* 122

Tabla 4.5.g *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 2* 122

Tabla 4.5.h *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 2* 122

Tabla 4.5.i *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 3* 124

Tabla 4.5.j *Resultados de cables del Puente E, etapa 3* 126

Tabla 4.5.k *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 3* 127

Tabla 4.5.l *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 3*.....127

Tabla 4.5.m *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 4* 130

Tabla 4.5.n *Resultados de cables del Puente E, etapa 4* 131

Tabla 4.5.o *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 4* 132

Tabla 4.5.p *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 4* 133

Tabla 4.5.q *Resultados de elementos en tablero del Puente E, etapa 5* 135

Tabla 4.5.r *Resultados de cables del Puente E, etapa 5*.....138

Tabla 4.5.s *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E, etapa 5*.....139

Tabla 4.5.t *Resultados de pila 1 del Puente E, etapa 5* 139

Tabla 4.5.s *Resultados de elementos en tablero del Puente E terminado* 142

Tabla 4.5.t *Resultados de cables del Puente E terminado* 144

Tabla 4.5.u *Resultados de desplazamientos en tablero de Puente E Terminado*.....146

Tabla 4.5.v *Resultados de pila 1 del Puente E terminado* 146

Tabla 4.5.w *Resultados máximos de elementos en tablero del Puente E* 146

Tabla 4.5.x *Resultados máximos de cables del Puente E* 146

Tabla 4.5.y *Resultados máximos de desplazamientos en tablero del Puente E* 147

Tabla 4.5.z *Resultados máximos de pila 1 del Puente E*.....147

Tabla 5.5.a *Casos más críticos de cada puente para la relación B*.....161

Tabla 6.1.a *Registros sísmicos utilizados para el análisis no lineal*.....162

Tabla 6.1.b *Tiempo de construcción (T_c) considerado para diferentes procedimientos constructivos* 163

Tabla 6.1.c *Periodo de retorno correspondiente a la etapa constructiva de cada procedimiento constructivo*.....163

Tabla 6.1.d *Relación $a_{cons}/a_{g,475}$ para diferentes métodos constructivos*.....164

Tabla 6.1.e *Datos de los registros sísmicos utilizados en el análisis no lineal*.....165

Tabla 6.3.a *Relaciones 3C/2C de la fuerza axial resultante en la articulación*.....177

Tabla 6.3.b *Relaciones 3C/2C del momento máximo en la articulación* 180

Tabla 6.4.a *Relaciones 3C/2C de la fuerza axial resultante en la articulación*.....186

Tabla 6.4.b *Relaciones 3C/2C del momento máximo en la articulación considerando condiciones para puente nuevo* 188

Tabla 7.1.a *Comportamiento del índice de daño de Park y Ang* 194

Tabla 7.1.b *Ductilidad de curvatura (μ_φ) con 2C* 195

Tabla 7.1.c *Ductilidad de curvatura (μ_φ) con 3C*.....195

Tabla 7.1.d *Índices de daño (I_D) de Park y Ang*.....196

Tabla 7.1.e *Ductilidad de curvatura (μ_φ) con condiciones para puente nuevo*.....196

Tabla 7.1.f *Índices de daño de Park y Ang (I_D) con condiciones para puente nuevo* 196

Tabla 5.5.a *Casos más críticos de cada puente para la relación B*.....199

Bibliografía

1. Association des Professeurs de Langues des Instituts Universitaires de Technologie. (11 de Agosto de 2010). *APLIUT*. Recuperado el 16 de Agosto de 2010, de http://www.apliut.com/pages/aideenseignement/swapshop_Nimes07/desparbes%20_bridges.pdf

2. British Standards Institution. (1998-2:2005). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2.* Brussels: European Committee for Standardization.

3. Broekhuizen, D. S. (1996). *Effects of Vertical Acceleration on Prestressed Concrete Bridges.* Austin: The University of Texas at Austin.

4. Button, M. R., Cronin, C. J., & Mayes, R. L. (1999). *Effect of vertical Ground Motion on the Structural Response of Highway Bridges.* Buffalo: Multidisciplinary Center For Earthquake Engineering Research.

5. Collier, C., & Elnashai, A. (2001). A Procedure for Combining Vertical and Horizontal Seismic Action Effects. *Journal of Earthquake Engineering, 5*(4), 521-539.

6. Concrete Bridge Development Group. (s.f.). Incrementally Launched Concrete Bridges. *Current Practice Sheet No. 13*.

7. CSI. (2010). "SAP2000: Structural Analysis Program", Advanced Version 14.2.0. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc.

8. CSI. (2011). "PERFORM 3D: Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures", Version 5.0.0. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc.

9. LA JORNADA. (12 de Abril de 2006). *El Porvenir.* Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de http://www.elporvenir.com.mx/notas.asp?nota_id=60929

10. Mexpresa. (s.f.). *Construcción de Puentes de Concreto Mediante el Sistema de Lanzamientos Por Incrementos Sucesivos.* México.

11. Papazoglou, A., & Elnashai, A. (1996). Analytical and Field Evidence of the Damaging Effect of Vertical Earthquake Ground Motion. *Earthquake Engineering and Structual Dynamics, 25*, 1109-1137.

12. Park, R., & Paulay, T. (1996). *Estructuras de Concreto Reforzado.* Distrito Federal, México: Limusa S.A. de C.V.

13. Perea, T., & Esteva, L. (2005). Componente Vertical de Registros Sísmicos en México y su Efecto en la Respuesta Sísmica No Lineal de Edificios. *Revista de Ingeniería Sísmica*(72), 45-79.

14. Priestley, M., Seible, F., & Calvi, G. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

15. Rosignoli, M. (2002). *Bridge Launching.* Parma: Thomas Telford.

16. Sashi Kunnath, N. A. (s.f.). Effects of Vertical Ground Motions on Seismic Response of Highway Bridges.

17. Secretaria de Comunicaciones y Transporte. (2002). *Proyecto de Puentes y Estructuras.* México: SCT.

18. Shrestha, B. (2009). Vertical Ground Motions and its Effect on Engineering Structures: A state-of-the-art-review.

19. Solís, S. (3 de febrero de 2005). *EsMas.* Recuperado el 24 de Octubre de 2010, de http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/423330.html

20. Universitat Politécnica de Catalunya. (s.f.). *Tipología de Puentes*. Recuperado el 17 de Agosto de 2010, de http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3284/5/53977-5.pdf

21. Vera, C. O. (2006). Damage Evaluation in R/C Sheer Walls Using the Damage Index of Park & Ang. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 1-10.

22. VLS International LTD. (1977). *The Incremental Launching Method in Prestressed Concrete Bridge Construction.* Berne, Switzerland: Gerber AG.

23. Wai-Fah Chen, L. D. (2000). *Bridge Engineering Hanbook.* United States of America: CRC Press.

24. Walter Podolny, J. B. (s.f.). *Construction and Design of Cable-Stayed Bridges.* John Wiley & Sons.

25. Walther, R. (2003). *Cable Stayed Bridges.* Londres: Thomas Telford.

26. Wikipedia, La Enciclopedia Libre. (17 de Agosto de 2010). *Puente en Arco*. Recuperado el 19 de Agosto de 2010, de http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_en_arco

27. Ytza, M. F. (2009). Métodos Constructivos de Puentes Atirantados - Estudio de la Distribución de Fuerzas En los Tirantes. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 28.

28. Žderić, Ž. (2008). Cantilever Erection of Arch Bridges. *Long Arch Bridges*.