



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TESIS

"Modelos analíticos de puentes carreteros"

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

MARIO GASPAR VILLEGAS

ASESOR:

DRA. BERTHA ALEJANDRA OLMOS NAVARRETE

MORELIA, MICHOACÁN, ENERO DEL 2012





Agradecimientos

A mis padres maravillosos que dios me regalo, Mario y Argelia, por su incondicional apoyo pero sobre todo por su infinito amor y comprensión.

A mis hermanas Yohana, Magda y Mariana, por ser parte de mi vida, por sus apoyo y consejos para ser cada vez una mejor persona.

A Lili, una persona extraordinaria que siempre ha estado conmigo cuando más lo he necesitado, por su paciencia, comprensión y por ese inmenso amor.

A todas aquellas personas que han contribuido a lo largo de mi vida en mi formación académica y como persona, gracias.



Índice

Capítulo I

1. Introducción.....	5
----------------------	---

Capítulo II

2. Descripción de los componentes de puentes de CR de longitud intermedia.....	6
2.1. La superestructura.....	10
2.2. La subestructura.....	15

Capítulo III

3. Modelos analíticos de puentes.....	17
3.1. Sistemas de un grado de libertad.....	18
3.2. Tipos de modelos analíticos empleados en puentes.....	20
3.3. Modelos globales.....	20
3.4. Modelos de puentes a base de marcos.....	21
3.5. Modelos de vigas.....	22

Capítulo IV

4. Modelos tradicionales en 3D con el software SAP2000.....	23
4.1. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas con columnas.....	26
4.1.1. Modelado de la subestructura.....	29
4.1.2. Modelado de la superestructura.....	44
4.1.3. Definición de la carga muerta.....	50
4.1.4. Definición de la carga viva.....	53
4.1.5. Definición de las líneas donde circulan las cargas vivas en el puente.....	56
4.1.6. Análisis estructural del modelo analítico del puente.....	59
4.2. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muro.....	69
4.2.1. Modelado de la subestructura.....	70



4.3. Puente continuo sobre apoyos de neopreno.....	78
--	----

Capítulo V

5. Modelos 3D con la herramienta “Bridge Wizard” del software SAP2000.....	79
5.1. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas con columnas.....	80
5.1.1. Definición de la geometría del puente.....	81
5.1.2. Sección transversal del puente.....	83
5.1.3. Diafragmas.....	84
5.1.4. Restricciones.....	85
5.1.5. Apoyos.....	86
5.1.6. Estribos.....	87
5.1.7. Apoyos intermedios.....	88
5.1.8. Objetos del puente.....	90
5.1.9. Actualización del modelo.....	92
5.2. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muro.....	94
5.3. Puente continuo sobre apoyos de neopreno.....	97

Capítulo VI

6. Comparación de modelos estructurales.....	98
6.1. Extracción de resultados de los modelos analíticos.....	101
6.2. Ventajas y desventajas en la creación de los modelos.....	110
6.2.1. Ventajas en la creación de los modelos de la forma tradicional.....	110
6.2.2. Desventajas en la creación de los modelos de la forma tradicional.....	111
6.2.3. Ventajas en la creación de los modelos con la herramienta “Bridge Wizard”.....	112
6.2.4. Desventajas en la creación de los modelos con la herramienta “Bridge Wizard”.....	112
6.3. Propiedades dinámicas de los puentes.....	113
6.4. Elementos mecánicos en las barras.....	117
6.4.1. Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas con columnas.....	117



6.4.2. Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muro.....	129
6.4.3. Puentes continuos sobre apoyos de neopreno.....	140

Capítulo VII

7. Conclusiones.....	150
----------------------	-----

Capítulo VIII

8. Bibliografía.....	152
----------------------	-----



Capítulo I

1. Introducción

La necesidad humana de cruzar obstáculos, como los arroyos y ríos, para llegar a un lugar determinado, fue el origen de la historia de los puentes, el cual se remonta a la prehistoria misma. Los primeros puentes como tal, eran construcciones muy endebles ya que principalmente eran arboles atravesados para conectar dos orillas, los cuales rara vez soportaban cargas pesadas. Fue esta insuficiencia de resistencia que llevó al ser humano a perfeccionar los materiales y formas estructurales utilizadas en la construcción de los puentes, utilizándose por primera vez el arco durante el imperio Romano como elemento estructural de los puentes y después de esta eficiente e innovadora solución estructural siguieron los puentes de ladrillo con mortero. La civilización Inca en Sudamérica, antes de la colonización europea en el siglo XVI, utilizó un prototipo muy sencillo de puentes colgantes suspendidos, mientras que el reinado de Julio César utilizaba la piedra y la madera para este fin. Con el desarrollo del acero y del concreto reforzado como materiales estructurales durante la revolución industrial en el siglo XIX, fue posible la construcción de puentes mucho más largos y resistentes.

En la actualidad, los puentes que se diseñan y se construyen suelen presentar con mayor frecuencia formas estructurales mucho más complejas, esto es gracias a los pasos agigantados que han dado la ciencia y la tecnología. Por lo que es necesario recurrir a modelos matemáticos o analíticos de los puentes más refinados que permitan predecir en forma más cercana a la realidad el comportamiento estructural ante las acciones a que estará sometido durante su vida útil; como lo son la carga viva, carga muerta y carga accidental (sismos, vientos, explosiones, huracanes, entre otras). Cabe mencionar que dichos modelos serán tan simples o tan complejos como la estructura misma lo



demande. Actualmente se cuenta con software que permite modelar prácticamente cualquier tipo de geometría que presente un puente, una de estas herramientas es el programa SAP2000. El software SAP 2000 permite modelar los puentes de dos formas diferentes: forma tradicional y con ayuda de la herramienta Bridge Wizard. Cualquiera que sea la forma elegida para desarrollar el modelo deberá presentar comportamientos estructurales muy similares sin variaciones significativas.

Así pues, sin duda alguna los puentes son estructuras que han sido y seguirán siendo parte fundamental para el desarrollo de un país y por lo tanto del ser humano como sociedad, ya que estas estructuras permiten la comunicación y el flujo de mercancía, por lo tanto es el reflejo del crecimiento económico de un país, mejorando así la calidad de vida de las personas que lo habitan.

En este trabajo se presenta una guía simplificada para que una persona con poco conocimiento del desarrollo de un modelo analítico de un puente en el programa SAP2000, sea capaz de hacer el modelo de un puente utilizando las herramientas que se describen detalladamente a lo largo de este documento.

Capítulo II

2. Descripción de los componentes de puentes de CR de longitud intermedia

Los puentes son estructuras de madera, piedra, ladrillo, concreto simple, concreto reforzado o acero estructural que se utilizan para que una vía de comunicación libre ríos, lagos, presas, depresiones del terreno ó incluso otra vía



de comunicación. Las figuras 2.1 y 2.2 son una muestra de puentes construidos en el mudo.



Figura 2.1 Puente Ing. Antonio Dovalí Jaime.

Veracruz, México (tomada de [wikimedia.org](https://www.wikimedia.org/)).

El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y de la naturaleza del terreno sobre el que el puente es construido. Su proyecto geométrico, diseño y cálculo pertenecen a las áreas de la Ingeniería en vías terrestres, hidráulica, mecánica de suelos y estructural, siendo numerosas las soluciones de diseño que se pueden presentar para un mismo proyecto.

Los materiales disponibles en la zona, las técnicas con que se cuentan, las consideraciones económicas-sociales y actualmente la sustentabilidad de la construcción, son factores que determinan o influyen sobre la solución final del diseño.



Figura 2.2 El puente de Alcántara sobre el Río Tajo, España (Tomado de [wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alcantara_Bridge.jpg)).

Actualmente, tanto los materiales y las técnicas implementadas en el diseño de puentes son muy diversas, gracias a los avances en la tecnología, que han permitido que se desarrollen modelos refinados de las estructuras que hace algunos años eran imposibles de realizar en periodos cortos de tiempo. Por otro lado, se han desarrollado nuevos materiales que por sí solos o en conjunto con los tradicionales (acero y concreto reforzado) mejoran la resistencia y comportamiento de las estructuras. Entre estos, los materiales compuestos (fibra de carbón, de vidrio y aramidas, entre otros) han sido empleados tanto para la rehabilitación y refuerzo de las estructuras existentes como para nuevos diseños. Las características que hacen que un material sea adecuado para cumplir funciones estructurales están principalmente relacionadas con sus propiedades mecánicas y su costo.

Existe un gran número de puentes construidos de acero y mampostería (natural y artificial), pero sin duda alguna el concreto reforzado ha sido el material predilecto para la construcción de estas estructuras debido a su extraordinario comportamiento estructural, ya que aprovecha en forma muy eficiente la buena resistencia del concreto a la compresión, su durabilidad, resistencia al fuego y moldeabilidad, lo cual se complementa con las propiedades del acero, alta resistencia a tensión y ductilidad, permitiendo que se tenga un elemento más adecuado para resistir las demandas impuestas en



la estructura. Las figuras 2.3 y 2.4 son una muestra de los valores de resistencia alcanzados por estos materiales en pruebas de compresión (elemento de concreto) y tensión (varilla de acero) respectivamente.

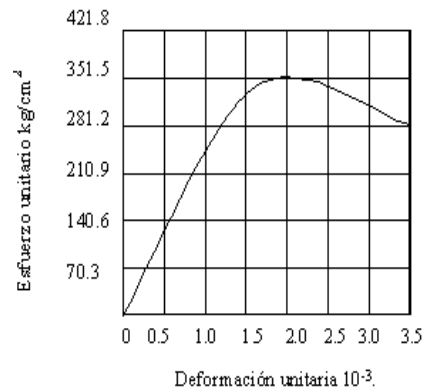


Figura 2.3 Curva esfuerzo-deformación Concreto simple de 350kg/cm² (www.construaprende.com).

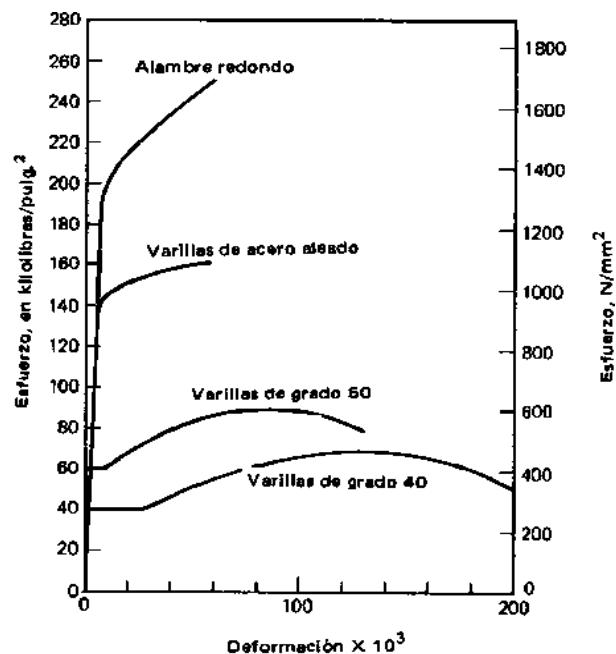


Figura 2.4 Cuerva esfuerzo-deformación para diferentes calidades del acero (www.construaprende.com).



Un puente está formado por la superestructura, la subestructura y la infraestructura. A continuación se describen las características y funciones más importantes que deben de cumplir estos subsistemas para que el sistema se desempeñe correctamente.

2.1. La superestructura

La superestructura de un puente es la parte que permite el tránsito, ya sea de vehículos o de personas, y está formada por los siguientes elementos: tablero o losa, guarniciones, parapetos, juntas de dilatación, banquetas, entre otros elementos.

Su sección transversal puede estar compuesta por diferentes geometrías, dependiendo del tipo de puente.

El tablero es construido generalmente de concreto reforzado y sobre él, para dar una continuidad a la rasante de la vía, se coloca una capa de carpeta asfáltica, que al desgastarse por el tránsito de vehículos deberá ser repuesta.

Debido a los constantes cambios de temperatura que se presentan en el medio ambiente, la superestructura experimenta constantes cambios de longitud, de mayor o menor magnitud. Estos cambios son casi imperceptibles e incluso se pudiera pensar de manera equivocada que no tienen gran importancia; sin embargo, el conocimiento de este fenómeno, es importante para evitar la presencia de grietas debidas a la contracción y dilatación del concreto. Así pues, las juntas de dilatación son puntos débiles de la superficie



de rodamiento, por lo cual se debe de tener mucho cuidado durante su proyecto y construcción. Sus funciones principales son las siguientes:

- Asegurar que los movimientos del puente proyectados sobre las juntas, se hagan de manera adecuada sin golpear o deteriorar sus elementos.
- Proporcionar la correcta continuidad de la superficie de rodamiento.
- Ser impermeables y desalojar las aguas sobre la calzada.
- No deben ser fuentes de ruidos excesivas al soportar el tránsito vehicular.



Figura 2.5 Vista en planta de la superestructura.



Por cuestiones de seguridad, se suelen colocar parapetos ó barandas que impiden que los vehículos al salirse de su carril de circulación pudieran caerse de la estructura misma, también en algunos casos funcionan como protección para todos los peatones que circulen sobre la calzada del puente.

Es necesario que la superestructura sea capaz de evacuar las aguas que se precipiten sobre ella, para esto, por lo general se utilizan tubos de plástico, cemento, asbesto o de cualquier otro material que pueda desalojar el agua fuera de la superficie de rodamiento.

Para la construcción de puentes, es muy frecuente que se utilicen los siguientes tipos de vigas cuyas propiedades y geometrías se muestran en las tablas 1 a 3 y en las figuras 2.6 a 2.8:

- Trabes T y doble T: Para puentes peatonales y puentes vehiculares (también se suelen usar para entrepisos y cubiertas).

Tabla 1 Propiedades (www.mexpresa.com).

Propiedades de secciones de trabes "T" y "Doble T"					
Tipo	H (cm)	B1 (cm)	B2 (cm)	Claro (m)	A (cm²)
T	120 máx.	Variable	300	15 a 20	variable
Doble T	90 máx.	9	300	20 a 25	variable

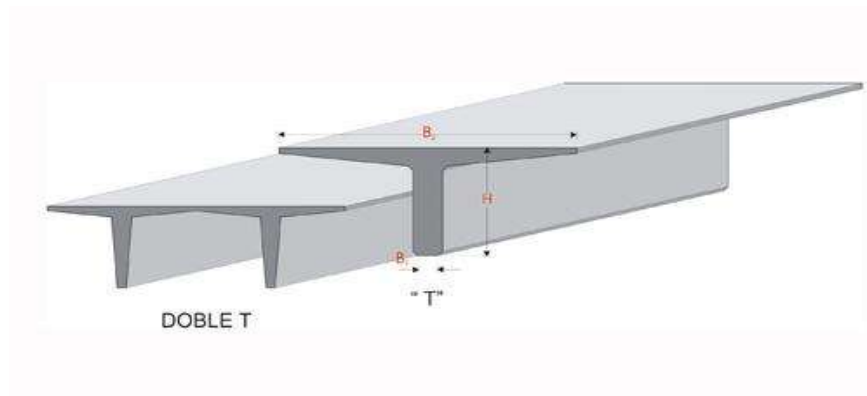


Figura 2.6 Secciones transversales de las travesaños
(www.mexpresa.com).

- Travesaños cajón: Suelen usarse para puentes ferroviarios, peatonales y vehiculares.

Tabla 2 Propiedades (www.mexpresa.com).

Propiedades de secciones de travesaños CAJON para puentes					
Tipo	H (cm)	B1 (cm)	B2 (cm)	Claro (m)	A (cm ²)
115	115	85	200	13 a 18	5,5625
135	135	81	200	20 a 30	5,8614
150	150	81	190	30 a 35	5,871
170	160	80	190	35 a 40	6,623

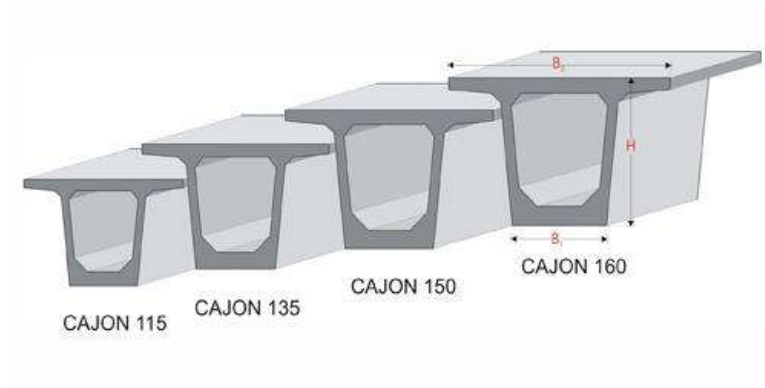


Figura 2.7 Secciones transversales de las trabes (www.mexpresa.com).

- Trabes AASHTO: Puentes ferroviarios y vehiculares.

Tabla 3 Propiedades (www.mexpresa.com).

Propiedades de secciones de trabes AASHTO para puentes					
Tipo	H (cm)	B1 (cm)	B2 (cm)	Claro (m)	A (cm ²)
I	71	40	30	10 a 13	1,743
II	91	45	30	12 a 18	2,325
III	115	56	40	16 a 24	3,629
IV	135	66	50	21 a 30	4,974
V	160	71	107	27 a 36	6,463
VI	183	71	107	33 a 42	6,923

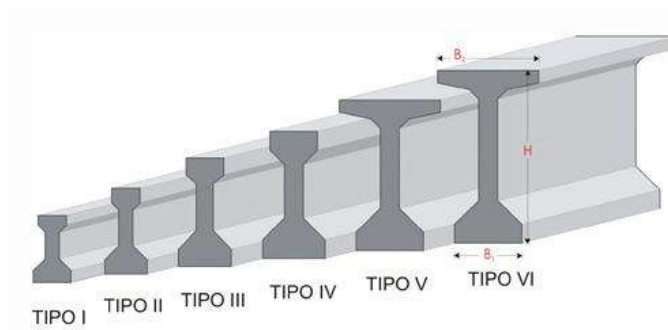


Figura 2.8 Secciones transversales de las travesaños (www.mexpresa.com).

Si los claros tienen longitudes relativamente grandes, entre cabezal y cabezal (subestructura) se utilizan diafragmas; vigas secundarias y transversales a las anteriores que sirven para prever al puente de rigidez transversal.

2.2. La subestructura

La subestructura de un puente son los elementos o sistemas de apoyo que se encargan de transmitir las cargas de la superestructura a la cimentación. Está constituida por cabezales y columnas de concreto armado, estribos, cepas, topes sísmicos, apoyo de neopreno, entre otros elementos.



Figura 2.9 Detalle de conexión entre la superestructura y la subestructura.



Los cabezales pueden tener una sección transversal constante o variable, a través de toda su longitud de apoyo con la superestructura. Cuentan con topes sísmicos laterales e intermedios, con neoprenos verticales para frenar el movimiento del tablero (superestructura) sin dañar las vigas. El diseño de la sección transversal de las columnas es de gran importancia en el análisis estructural, ya que ésta es la que debe de transmitir, de manera adecuada, las cargas de la estructura del puente a la cimentación.

En los puentes podemos tener los siguientes tipos de subestructura:

- a) Apoyos en los extremos; estos apoyos tal y como se menciona, se localizan en los extremos de los puentes y de acuerdo al tipo de suelo, pueden tener cimentaciones superficiales ó profundas.

A continuación se mencionan los tipos de apoyos más comunes:

- Caballete de concreto reforzado con cimentación superficial o profunda, por medio de columnas circulares ó rectangulares.
- Terraplén de tierra armada sobre el cual se apoya el cabezal y el muro de respaldo de concreto reforzado.
- Estribos de mampostería y corona, y muro de respaldo de concreto reforzado. Los estribos permiten retener los terraplenes de acceso al puente.
- Estribos de concreto reforzado con aleros o en cajón.

En la figura 2.10 podemos observar la ubicación de los estribos en un puente.



Figura 2.10 Estribos en puentes.

b) Apoyos intermedios; cuando la longitud del puente es muy grande, es necesaria la colocación de apoyos intermedios.

Estos apoyos pueden tener las siguientes modalidades:

- Pilas de concreto reforzado con cimentación superficial o profunda, formada por columnas rectangulares o circulares.
- Pilas de concreto reforzado con cimentación superficial, formadas por un muro de columnas

Capítulo III

3. Modelos analíticos de puentes

Podemos definir a los modelos analíticos como la idealización matemática más simple o más compleja implementada para estudiar el



comportamiento de una estructura (un puente, en nuestro caso), trabajando de manera individual o en conjunto.

Los modelos analíticos han tomado un papel muy importante, ya que han tenido un desarrollo extraordinario en las últimas décadas. Actualmente se cuenta con modelos sumamente refinados, los cuales son capaces de idealizar estructuras muy complejas, tomando en cuenta efectos y características del comportamiento de los materiales, tales como su no linealidad, la interacción de la estructura con el suelo, así como los efectos de su comportamiento dinámico, entre los aspectos más importantes. Estos modelos son capaces de brindar soluciones muy aceptables desde el punto de vista de la seguridad y la economía.

Sin embargo, no hay que olvidar que lo que analizan estos modelos son idealizaciones matemáticas de la estructura. Así pues, se debe de tener un especial cuidado en los datos o parámetros utilizados para representar el fenómeno real del sistema y en los resultados que se estén obteniendo, para juzgar la idoneidad de los resultados obtenidos.

3.1. Sistemas de un grado de libertad

En los modelos analíticos, es importante determinar el número de grados de libertad a considerar en el estudio de cualquier estructura, ya que esto es la base para determinar el comportamiento esperado de un sistema estructural ante una o varias demandas generadas por la acción de diferentes fenómenos. Así, se define como grados de libertad al número de desplazamientos relativos necesarios, independientes entre sí, para determinar la posición deformada de un elemento.



La figura 3.1, muestra los parámetros en la representación matemática de los sistemas de un grado de libertad, indicado por los vector $u(x)$ de cada una de estas figuras.

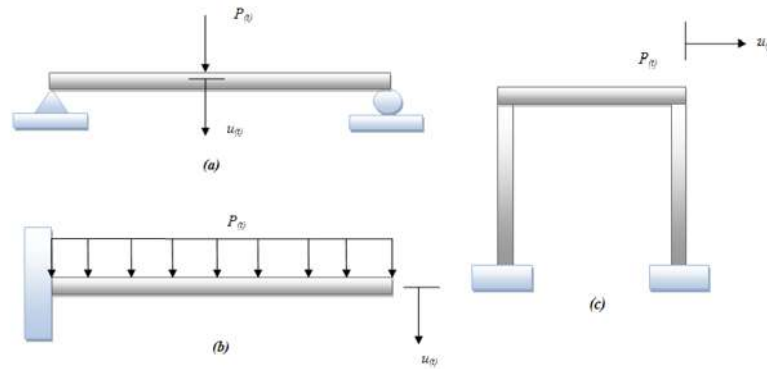


Figura 3.1 Ejemplos de estructuras con un modelo analítico de un solo grado de libertad (M. Paz, 2002).

En la figura 3.2 podemos identificar las siguientes variables que relacionan directamente a dicho sistema con su comportamiento: 1) m , masa o propiedad de inercia de toda la estructura, 2) k , es un resorte equivalente a la rigidez desarrollada por todas las fuerzas internas de la estructura, así también representa la capacidad que posee el sistema para el almacenamiento de energía potencial, 3) c , amortiguamiento que representa las fuerzas de fricción y por consecuencia las pérdidas de energía que presenta la estructura, y 4) $p(t)$, representa las fuerzas que actúan sobre el sistema en función del tiempo.

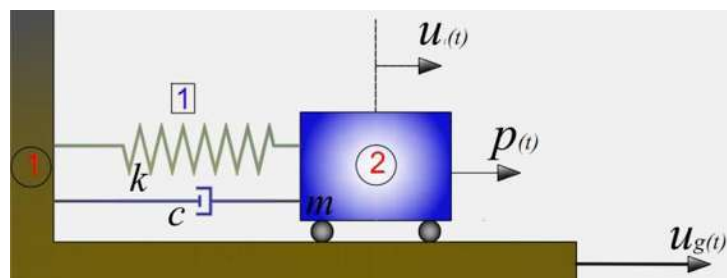




Figura 3.2 Simplificación matemática para el sistema de un grado de libertad (M. Paz, 2002).

3.2. Tipos de modelos analíticos empleados en puentes

Como ya se mencionó anteriormente, un puente está constituido por varios subsistemas, como lo son: la losa, vigas, cabezales, marcos y sistemas de apoyos (las pilas, estribos, columnas y cimientos). Estos subsistemas son muy importantes en la cuantificación de la respuesta sísmica esperada de toda la estructura, debido a sus características dinámicas de respuesta individual. Para determinar la importancia y diferencias entre ellos, en términos de respuesta sísmica del modelo analítico del puente, se hace una clasificación entre: modelos globales, modelos de marcos y modelos de vigas, que a continuación describiremos detalladamente.

3.3. Modelos globales

Los modelos globales de la estructura de un puente tienen una utilidad muy limitada y poco práctica, a menos que el puente posea las siguientes características:

1. El puente es corto y está formado por un solo marco.
2. La respuesta esperada se encuentra en el intervalo elástico.
3. Cuando se pueden determinar las variaciones del movimiento del suelo a lo largo de la longitud de todo el puente.



Los modelos globales representan o caracterizan el sistema total del puente, por lo cual, contribuyen a la verificación de los parámetros de cada subestructura, contribución que no es tomada en cuenta en los otros modelos.

En la figura 3.3, se presenta un modelo global de la estructura de un puente que, cumple con las características anteriormente mencionadas.

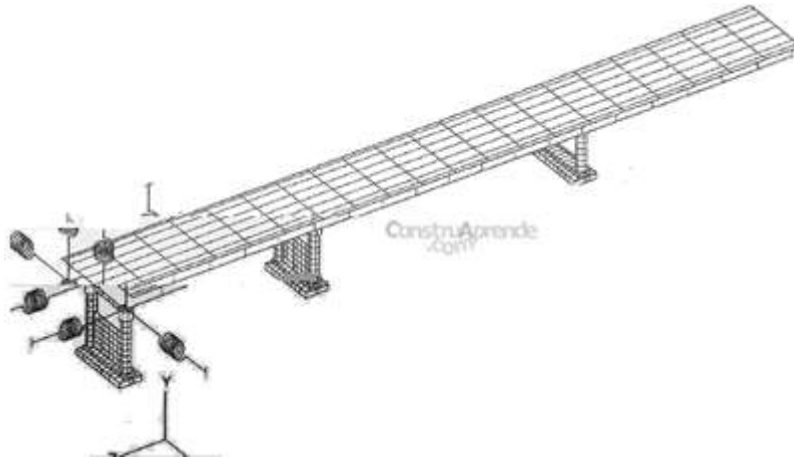


Figura 3.3 Modelo global (www.construaprende.com).

3.4. Modelos de puentes a base de marcos

Los modelos analíticos de un puente a base de marcos independientes, representan un sistema útil para determinar la respuesta sísmica, ya que, la caracterización dinámica de los marcos, se puede realizar de una forma muy aproximada y con una relativa facilidad.

Para analizar la interacción entre marco y marco, se suele hacer a base de resortes, modelados con propiedades elásticas lineales.

En la figura 3.4, podemos observar la forma de cómo modelar un puente a base de marcos.

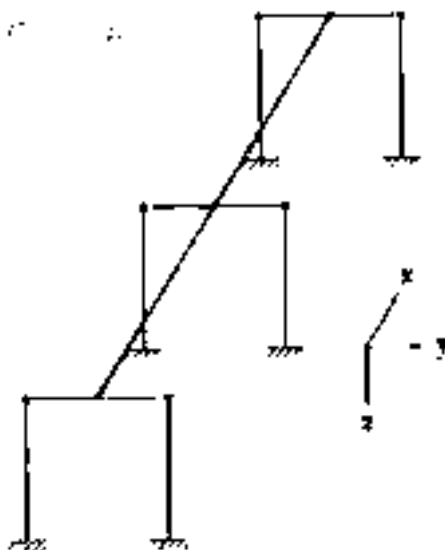


Figura 3.4 Modelo de marcos (www.construaprende.com).

3.5. Modelos de vigas

Para que este tipo de modelos represente de manera adecuada el puente, es necesario que las vigas (barras sujetas a cargas normales a su eje, las cuales resisten y transmiten a sus apoyos la carga por medio de flexión y cortante) que forman la estructura, se modele detalladamente, de acuerdo a los parámetros reales de las mismas. Esto se debe a que la rigidez de los marcos está dada directamente por las vigas.

Los modelos representados a base de vigas son usados principalmente para obtener la rigidez efectiva de estos modelos matemáticos. Las vigas idealizadas en estos sistemas, deberán incluir los efectos flexibles de la cimentación, pueden también, ser combinados en marcos como elementos a la mitad de la superestructura, tal y como se muestra en la figura 3.5.

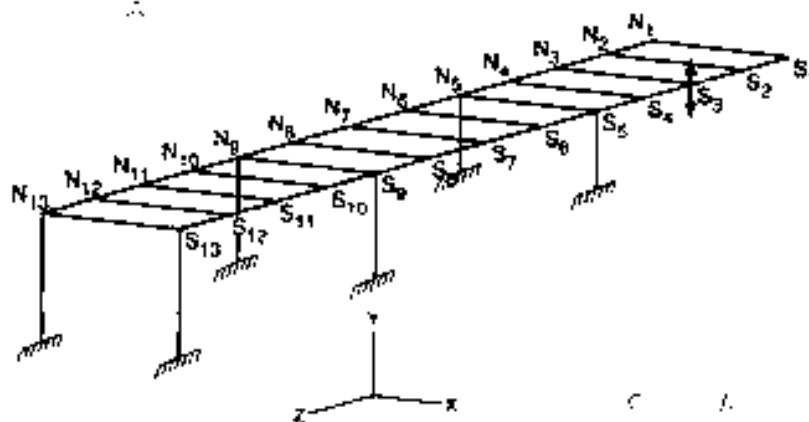


Figura 3.5 Modelos de vigas en puentes (www.construaprende.com).

Capítulo IV

4. Modelos tradicionales en 3D con el software SAP2000

El software SAP2000, nos permite modelar y analizar cualquier tipo de estructura, siendo así, uno de los softwares más utilizados en la ingeniería estructural. El programa permite realizar el diseño estructural de modelos analíticos desarrollados en este programa, el proceso de diseño se puede realizar con base en varios de los códigos estructural existentes y vigentes en la práctica profesional en varios países del mundo, como ejemplo se tienen los códigos de diseño para estructuras de concreto reforzado por el ACI propuesto en USA o las NTC del RDF utilizadas en México.

Antes de realizar el modelo analítico de cualquier tipo de estructura con esta herramienta (SAP2000), tenemos que definir el sistema de unidades con el cual deseamos trabajar. Podemos definir prácticamente cualquier sistema de unidades, siempre y cuando representen la realidad de las cargas y geometría correspondientes al caso de interés.



Para definir la localización de los elementos estructurales, el programa SAP2000 utiliza dos sistemas de referencia conocidos como sistemas coordenados global y local, cada uno definido por tres ejes de referencia x , y y z .

El sistema global, localiza todos los elementos desde un mismo punto, origen del sistema coordenado; es decir, mediante este sistema coordenado se define la conectividad de todos los elementos que conforman la estructura. El sistema coordenado local está definido individualmente para cada elemento estructural, siendo este su propio sistema de referencia, por lo tanto con base en este se definen los elementos mecánicos y esfuerzos que se generan en el elemento como efecto de las cargas a que se ve sometido. Los ejes (x , y y z) del sistema local tienen coordenada igual a cero en el nodo definido como inicial del elemento y su orientación sigue la regla de la mano derecha, previendo que el eje x siempre se localiza en dirección del eje longitudinal de barra y su sentido positivo se define desde el nudo inicial hacia el nudo final.

Modificar las propiedades de los materiales preestablecidos por el programa o definir nuevos materiales necesarios para el modelado de la estructura que se pretende analizar son opciones que nos permite utilizar el software ya que sería muy poco práctico suponer siempre el mismo tipo de propiedades de los materiales para todas las estructuras. Como se mencionó antes, el programa ya tiene materiales predeterminados como son: el concreto, acero, aluminio, formado en frío, barras y tendón. Teniéndose de esta forma una herramienta de análisis y diseño muy versátil.

Antes de comenzar la elaboración de un modelo, es importante definir los tipos de secciones que intervendrán en éste, lo cual estará en función del tipo de material y de las secciones transversales que constituirán a la estructura de



interés. Para lo anterior se hace uso de la herramienta “Frame Sections”, mediante la cual se determinan las propiedades de los elementos estructurales que serán parte del modelo analítico de la estructura, figura 4.1.

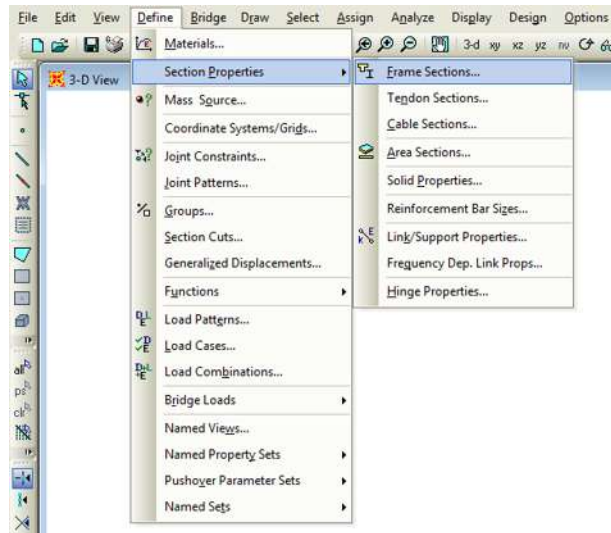


Figura 4.1 Herramienta “Frame Sections” (SAP2000).

Las figuras 4.2 a 4.4 presentan las secciones transversales que se utilizan con mayor frecuencia para materiales específicos como el acero, concreto y aluminio.

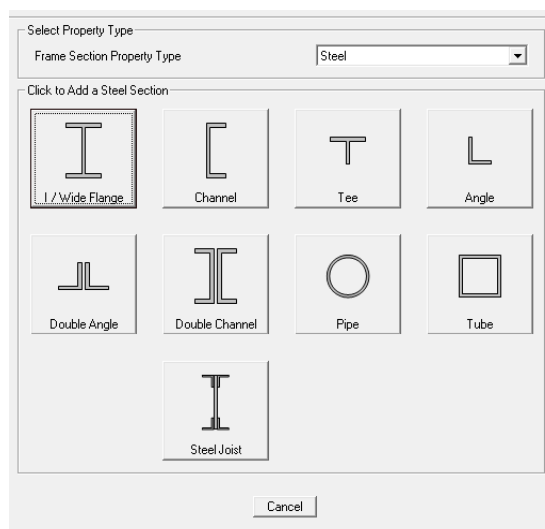




Figura 4.2 Secciones de acero (SAP2000).

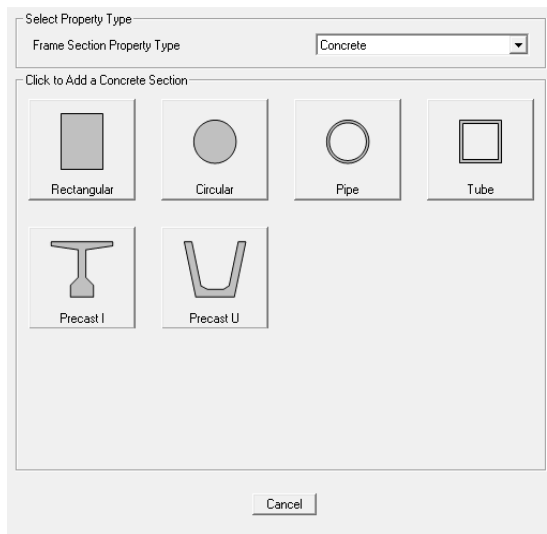


Figura 4.3 Secciones de concreto (SAP2000).

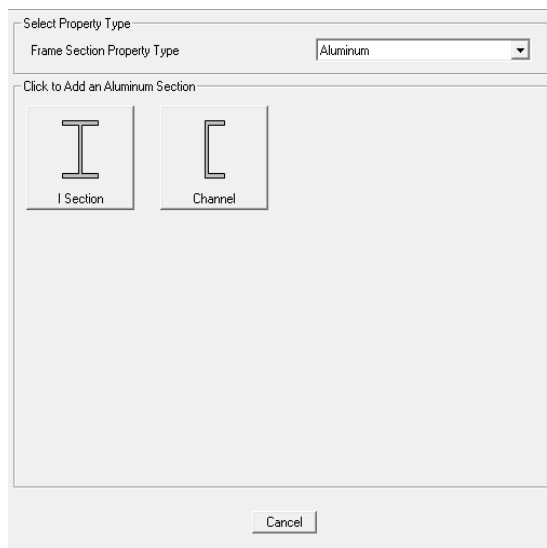


Figura 4.4 Secciones de aluminio (SAP2000).

4.1. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas con columnas



En el modelado de un puente es necesario tomar en cuenta los factores que intervienen en su comportamiento, respuesta estructural, para que su modelo sea realmente representativo de lo que le ocurre en la realidad. Estos aspectos se refieren a la geometría y caracterización adecuada de los miembros estructurales, detalles de apoyos y conexiones, acción de cargas (vivas, muertas y accidentales), participación de las masas, vehículos de diseño y líneas de acción de los mismos.

En esta sección describiremos la forma de modelar paso a paso la subestructura y superestructura de puentes simplemente apoyados, cabe mencionar que cada modelo puede realizarse de diferentes maneras, aquí se presenta una forma ordenada y sencilla para realizar un modelo tradicional en 3D con el software SAP2000.

Para explicar cómo se hace un modelo estructural tomaremos como ejemplo el puente Copándaro II localizado en la autopista México-Guadalajara, cuya localización está definida por -101.185989° de longitud y 19.886543° de latitud. Una vez desarrollado el modelo analítico se describirá como se conducen los análisis y el diseño estructural del mismo, la figura 4.5 muestra una vista longitudinal del puente que se utilizará como ejemplo.



Figura 4.5 Vista longitudinal del Puente Copándaro II.

El puente Copándaro II consta de tres claros de 23.05 m, 32.40 m y 22.86 m; para tener así una longitud total de 78.31 m con un ancho de 11.05 m. En cada claro de la estructura se cuenta con dos diafragmas; a cada 7.68 m en el primer claro (23.05 m), en el segundo claro (32.40 m) a cada 10.8 m y en el tercer y último claro (22.86 m) a 7.62 m. Son ocho vigas AASHTO tipo IV las que constituyen la superestructura. Parte de la subestructura del puente está formada por dos columnas circulares de concreto reforzado de 1.9 m de diámetro. En la figura 4.6 se pueden apreciar algunas de las características constructivas del puente, entre ellas las que se mencionan anteriormente.

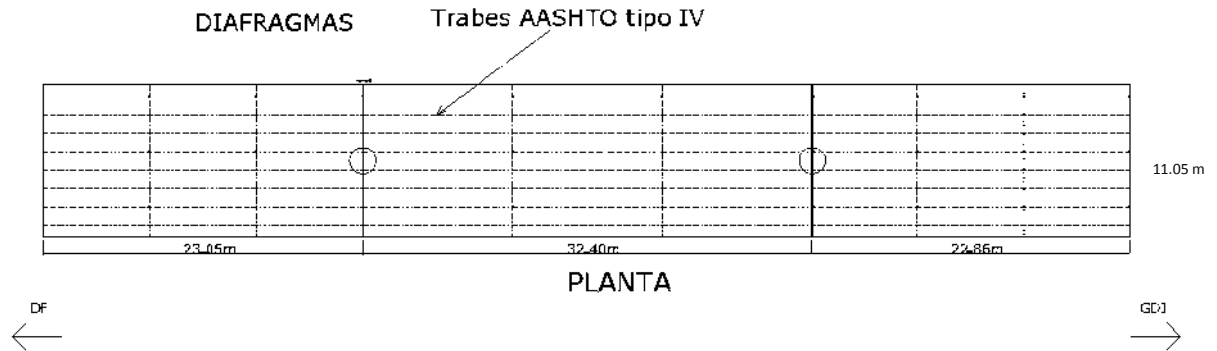


Figura 4.6 Vista en planta del Puente Copándaro II.

4.1.1. Modelado de la subestructura

Uno de los caminos que se tienen para realizar un modelo analítico en el programa SAP es definiendo mallas correspondientes a los elementos estructurales que definen al esqueleto de la estructura, esta forma de proceder es muy adecuada ya que las mallas son las guías para dibujar la forma de la estructura, conectándola adecuadamente con todos los elementos que sean concurrentes a un punto.

Para definir un nuevo modelo en el programa SAP utilizamos la opción de la barra de herramientas “File-New Model”, que permitirá desarrollar un nuevo modelo analítico. Para realizar la configuración de la malla que se desea sólo basta dar un clic derecho sobre el papel en blanco del modelo, buscamos la opción “Edit Grid Data” y enseguida se mostrará un cuadro con los tres ejes coordenados. Cada malla será designada por un número y una letra, en cada uno de los ejes.



En la malla se define lo largo y ancho del puente, así como la ubicación de las columnas, de las vigas, diafragmas y aquellos elementos que en conjunto formarán el esqueleto del puente.

En la figura 4.7, se muestran las propiedades de las mallas. En esta ventana del SAP2000 se pueden modificar su ubicación (“Ordinate”), su designación (“Grid ID”) y su visibilidad (“Visibility”).

The screenshot shows the 'Grid Data' dialog box in SAP2000, which is used to define the grid for a bridge model. It contains three tables for X, Y, and Z grid data, and a panel on the right for display options.

X Grid Data

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Bubble Loc.
1	A	0.	Primary	Show	End	
2	A'	0.04	Primary	Show	End	
3	B'	20.88	Primary	Show	End	
4	B	20.9	Primary	Show	End	
5	B''	20.92	Primary	Show	End	
6	C'	41.78	Primary	Show	End	
7	C	41.8	Primary	Show	End	
8	C''	41.82	Primary	Show	End	

Y Grid Data

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Bubble Loc.
1	1	0.	Primary	Show	Start	
2	2	0.9	Primary	Show	Start	
3	3	2.45	Primary	Show	Start	
4	4	4.	Primary	Show	Start	
5	5	5.55	Primary	Show	Start	
6	6	7.1	Primary	Show	Start	
7	7	8.65	Primary	Show	Start	
8	8	10.2	Primary	Show	Start	

Z Grid Data

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Bubble Loc.
1	Z1	0.	Primary	Show	End	
2	Z2	6.403	Primary	Show	End	
3	Z3	6.46	Primary	Show	End	
4						
5						
6						
7						
8						

Display Grids as:
☒ Ordinates ☐ Spacing
☐ Hide All Grid Lines
☐ Glue to Grid Lines
Bubble Size: 28.75
Reset to Default Color
Reorder Ordinates
OK Cancel

Figura 4.7 Configuración de la malla (SAP2000).

Una vez concluida la configuración de la malla de trabajo es conveniente definir la geometría de todas las secciones transversal que se van a utilizar y las propiedades de los materiales de que están constituidas. Como ya se mencionó anteriormente, podemos seleccionar el tipo del material y el tipo de sección transversal de la columna que se desee.



El modelo analítico que se desarrollará a lo largo de este capítulo, contará con dos columnas circulares de concreto reforzado que soportan todas las cargas que se presentan en toda la longitud de la superestructura; como se mencionó en la descripción del puente éstas tienen un diámetro de 1.9 m. En la figura 4.8 se presenta la ventana de datos a llenar con las propiedades que caracterizan a las columnas antes mencionadas.

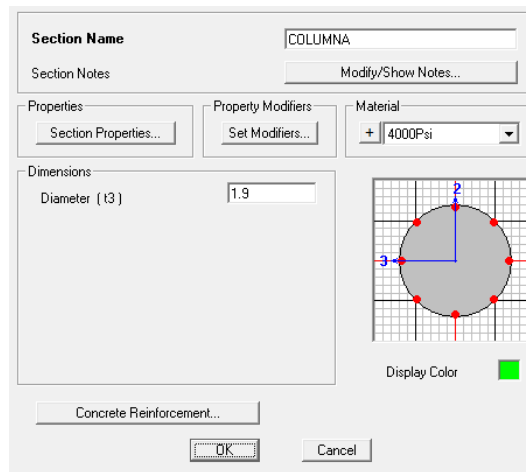


Figura 4.8 Propiedades de las columnas (SAP2000).

Para el modelado analítico de las columnas se utilizan elementos tipo “Frame”, los cuales modelan a una barra que tiene seis grados de libertad por cada uno de sus nodos, tres de traslación y tres de rotación con respecto a cada uno de los ejes coordenados locales. Las columnas se definen dibujando cada una de ellas seleccionando la herramienta correspondiente a elementos tipo “Frame”, se selecciona de la opción “Section” que se muestra en la ventana, la sección transversal correspondiente a la columna previamente definida, utilizando esta misma herramienta se dibujaran otros elementos estructurales del puente.



La figura 4.9 ilustra la ubicación y las propiedades que presenta el elemento tipo “Frame”, una herramienta muy útil para realizar los modelos analíticos.

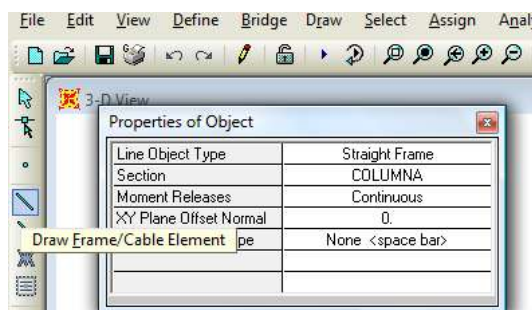


Figura 4.9 Elemento tipo “Frame” (SAP2000).

Una vez definidas las columnas del puente, podemos definir las condiciones de apoyo que tiene el puente como función del tipo de cimentación y el suelo de soporte donde descansa la estructura.

Por ello, primeramente se seleccionan los nodos en los que se definirán las condiciones de apoyo, esto se hace como se muestra en la figura 4.10a, una vez seleccionados los puntos de los elementos que se desean restringir, ubicamos la herramienta “Restraints”, la figura 4.10b ilustra la forma de realizar este proceso.

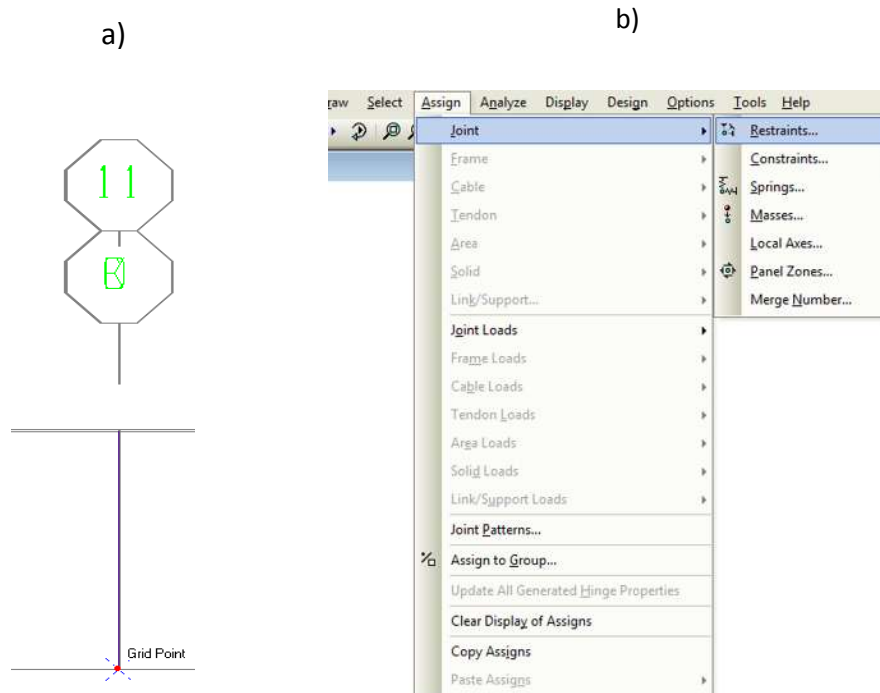


Figura 4.10 (a) Selección de un punto del elemento tipo “Frame”, plano “xz” y (b) Herramienta “Restraints” (SAP2000).

El programa despliega una ventana que muestra las diferentes opciones de restringir el punto seleccionado; traslación o rotación respecto a cada eje coordenado (x , y y z), sólo basta elegir los grados de libertad que se desee restringir. Es importante que se elijan con cuidado los grados de libertad a restringir, ya que en una gran medida depende de ello el comportamiento de la estructura. Esto se puede observar en la figura 4.11. Otra forma de realizar este proceso consiste en seleccionar la herramienta que representa el tipo de apoyo que tendrá el elemento (“Fast Restraints”); empotramiento, rodillo, articulación o en su defecto que no tenga ninguna restricción, aquí es importante hacer notar que esas condiciones de apoyo corresponde al modelo en 3D.

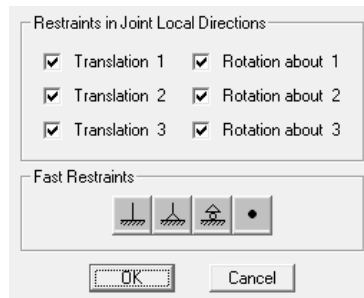


Figura 4.11 Restricción de un punto (SAP2000).

En la mayoría de los casos se considera a las columnas de los puentes con condiciones de apoyo de empotramiento perfecto; es decir, se restringen los seis grados de libertad que se tiene por nodo, ya que se busca que los elementos estructurales que forman la cimentación de un puente sean apoyos rígidos desplantado en una capa de terreno muy resistente, lo cual es equivalente a ésta condición estática. Finalmente, la representación gráfica del empotramiento de las columnas tendrá la forma mostrada en la de la figura 4.12.

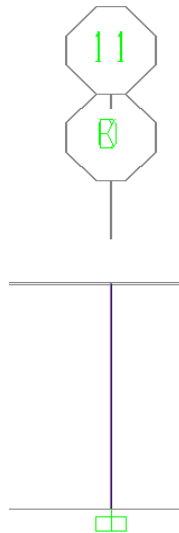


Figura 4.12 Empotramiento de columna, plano “xz” (SAP2000).



Para observar las propiedades geométricas y la orientación asignada a cada elemento estructural se hace una vista extruida del modelo, como se describe a continuación.

Seleccionamos la herramienta "Set display Options" como se muestra en la figura 4.13, remarcado con una ventana de color azul y una paloma, la selección de esta opción también puede hacerse utilizando la opción "ctrl+E", las opciones que ofrece esta herramienta se muestran en la figura 4.14, de donde seleccionamos la opción "Extrude View" para ver una vista isométrica del modelo.

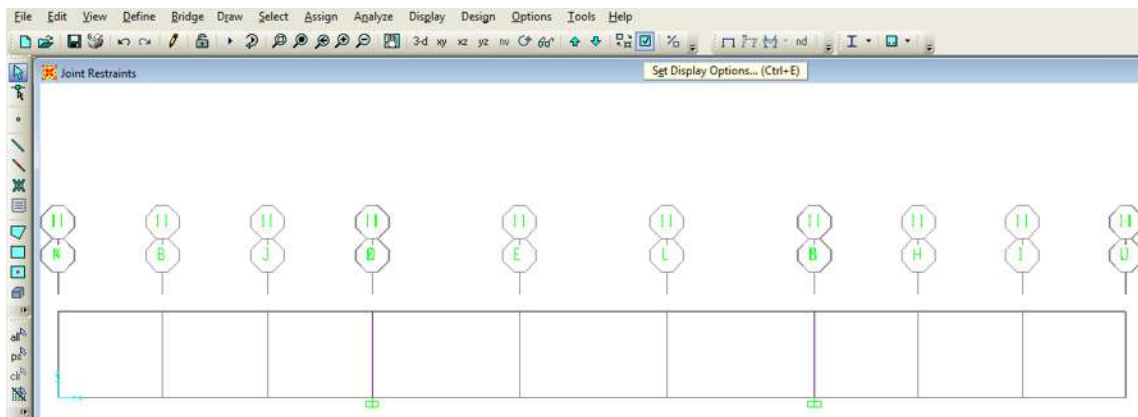


Figura 4.13 Plano "XZ" (SAP2000).

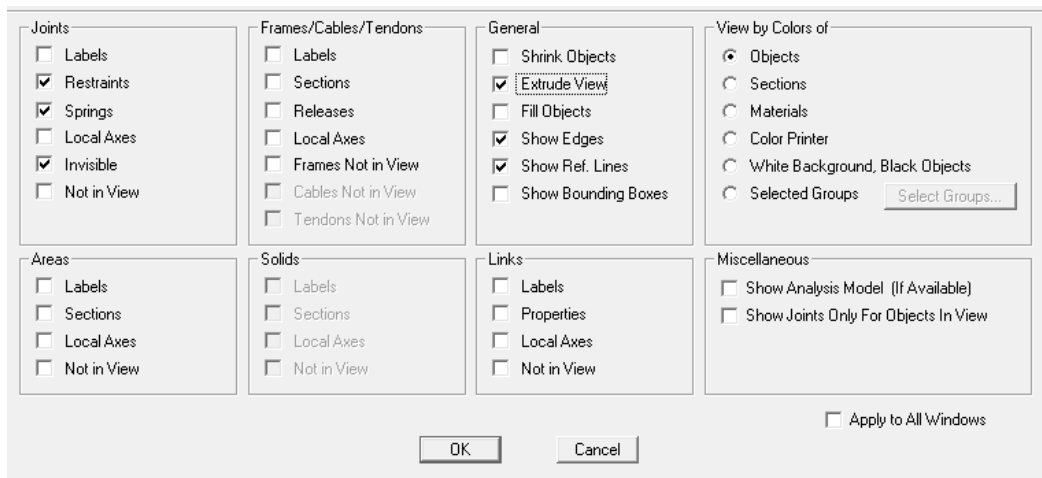


Figura 4.14 Opción “Extrude View” (SAP2000).

En la figura 4.15 se observan las columnas que se han definido en el modelo analítico que, a diferencia de la otra figura 4.13, se aprecian sus características geométricas.

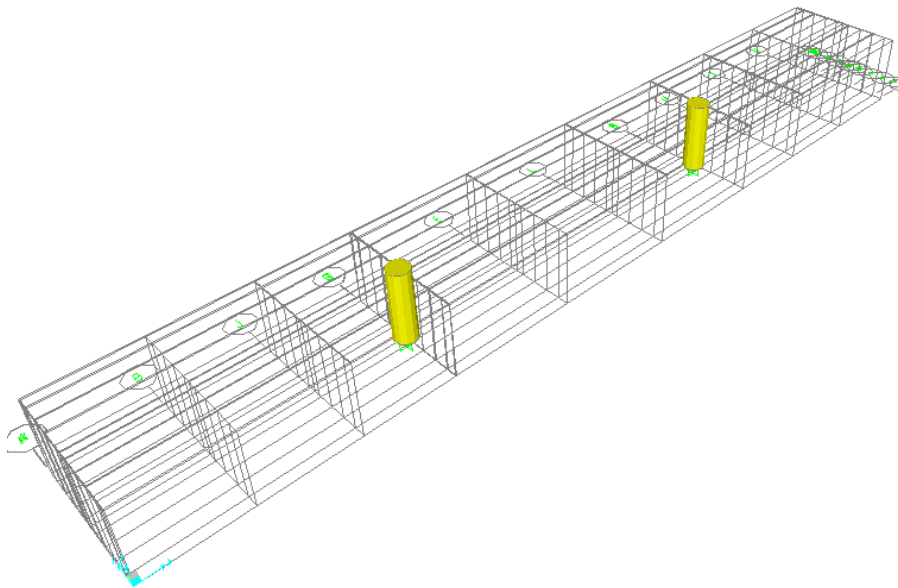


Figura 4.15 Empotramiento de las columnas, 3D (SAP2000).



Una vez definido el tipo de apoyo que se tiene en las columnas del puente, se modelan los cabezales de las pilas que forman la subestructura. La sección transversal que compone a los cabezales puede tener cualquier tipo, desde una sección continua hasta una variable, su forma depende de la geometría que presente cada caso.

La sección transversal que se modelará a continuación corresponde a una sección que es variable a lo largo de su longitud, para ello primero debemos definir el número de secciones transversales necesarias para la representación gráfica de la variabilidad. En este ejemplo solamente se requiere de tres secciones que combinadas proporcionarán la sección variable de interés (figura 4.18), las cuales se definen como “SEC1”, “VAR1” Y “VAR2”, sus dimensiones se muestran en las figuras 4.16 y 4.17.

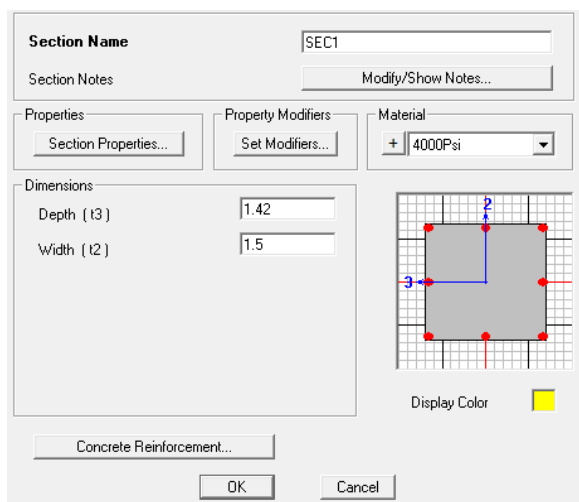


Figura 4.16 “SEC1” (SAP2000).



a)

Nonprismatic Section Name Display Color ☐

Section Notes

Start Section	End Section	Length	Length Type	EI33 Variation	EI22 Variation
SEC1	SEC2	0.675	Variable	Parabolic	Linear
SEC1	SEC2	0.675	Variable	Parabolic	Linear

b)

Nonprismatic Section Name Display Color ☒

Section Notes

Start Section	End Section	Length	Length Type	EI33 Variation	EI22 Variation
SEC2	SEC3	0.9	Variable	Parabolic	Linear
SEC2	SEC3	0.9	Variable	Parabolic	Linear

Figura 4.17 “VAR1” (a) y “VAR2” (b) (SAP2000).

La sección transversal del modelo analítico del cabezal queda definida como se muestra en la figura 4.18.

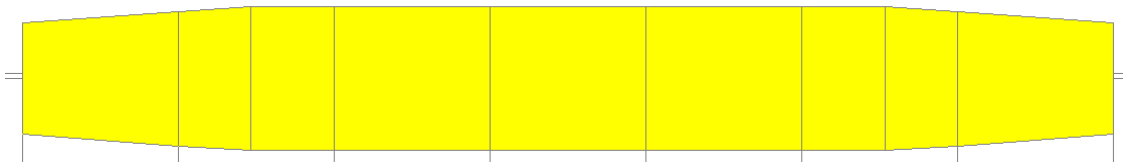


Figura 4.18 Sección transversal del cabezal, ejemplo (SAP2000).

Sin embargo, el puente Copándaro II consta de un cabezal cuya sección transversal es constante; 0.65m de peralte y 1m de ancho, figura 4.19.



Figura 4.19 Sección transversal del cabezal, puente Copándaro II (SAP2000).



Antes de realizar el modelo analítico de la losa, se debe determinar su localización y las dimensiones (longitud y ancho) de las juntas de dilación que se tienen en la superficie de rodamiento de los puentes; además de lo anterior, también es importante definir esta separación para realizar la conexión que existe entre las vigas y los cabezales.

Como ya se mencionó anteriormente, el puente Copándaro II consta de tres claros de 23.05 m, 32.40 m y 22.86 m. La longitud de las juntas de dilatación que se tiene en la losa es de 5 cm. Para poder representar esta conexión es necesario definir elementos auxiliares que tengan una sección transversal muy rígida, así mismo nos permite conectar a las trabes, "Links" y cabezales en el lugar correcto, para que el programa pueda evaluar correctamente la rigidez proporcionada por estos elementos. El programa por default conecta a todos los elementos con respecto del centroide de sus secciones trasversales.

Los elementos auxiliares deben estar constituidos por un material con características mecánicas representativas de un elemento rígido, lo cual implica que se tenga un módulo de elasticidad lo suficientemente grande para lograr este objetivo. Al definir este material debe tenerse cuidado de asignar un número representativo y no exageradamente grande, ya que valores muy grandes pueden ser la causa de problemas de inestabilidad numérica, las propiedades seleccionadas para este material se muestran en la figura 4.20.



The screenshot shows the 'Material Properties' dialog for a material named 'SOP APOYO'. The 'General Data' section includes the material name and type (Concrete). The 'Weight and Mass' section shows unit volume and mass per unit volume. The 'Isotropic Property Data' section includes Modulus of Elasticity (E), Poisson's Ratio (U), Coefficient of Thermal Expansion (A), and Shear Modulus (G). The 'Other Properties for Concrete Materials' section includes Specified Concrete Compressive Strength (f'c) and a checkbox for 'Lightweight Concrete'. The 'Switch To Advanced Property Display' checkbox is also present.

Property	Value
Material Name and Display Color	SOP APOYO
Material Type	Concrete
Weight per Unit Volume	0
Mass per Unit Volume	0
Units	Tonf, m, C
Modulus of Elasticity, E	1.905E+08
Poisson's Ratio, U	0.3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	73269231
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	2109.2089
Lightweight Concrete	☐
Shear Strength Reduction Factor	

Figura 4.20 Características mecánicas del material de apoyo (SAP2000).

Una vez definido el material de apoyo se define la sección transversal denominada soporte de apoyo constituida con este material, figura 4.21. Es importante mencionar que estos elementos se ubican perpendicularmente al cabezal de la estructura.

The screenshot shows the 'Section Properties' dialog for a section named 'SOP APOYO'. The 'Dimensions' section includes Depth (t3) and Width (t2). The 'Material' section includes a dropdown menu for the material. The 'Concrete Reinforcement...' button is also present.

Property	Value
Section Name	SOP APOYO
Depth (t3)	2
Width (t2)	2
Material	SOP APOYO

Figura 4.21 Sección transversal del material de apoyo (SAP2000).



Las vigas descansan sobre apoyos formados por placas intercaladas de neopreno y de acero (figura 4.22), estos se modelan con elementos tipo “Link”. Los apoyos de los puentes reales tienen apoyos donde se varía su altura, generalmente son de dos tipos cuya finalidad es representar las condiciones de apoyos articulados, fijos o de rodillos, es decir a cada claro simplemente apoyado se le da en sus extremos las condiciones de apoyo fijo y otro móvil, la condición depende fundamentalmente de su altura.

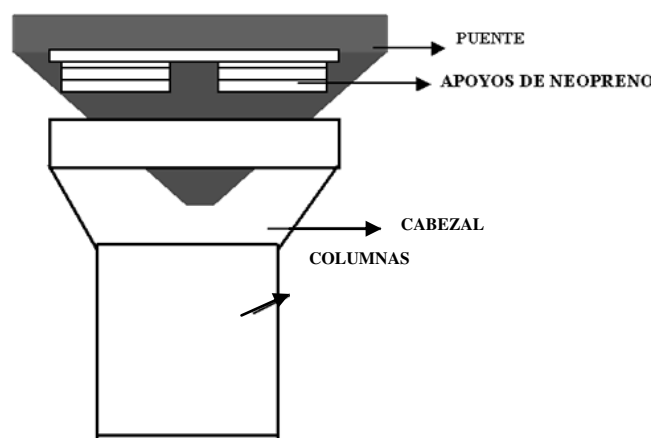


Figura 4.22 Apoyos de neoprenos en puentes (www.hormigoma.com).

Para nuestro ejemplo nombraremos a estos elementos tipo “Link” como móvil y fijo, cada uno con características diferentes, como se indica en la figura 4.23. Los elementos se definen con el valor de la rigidez que proporcionan a la estructura correspondiente a los tres grados de libertad en traslación. Es importante señalar que estos elementos tienen un comportamiento lineal, por lo que hay que tener cuidado de asignarles esta propiedad.

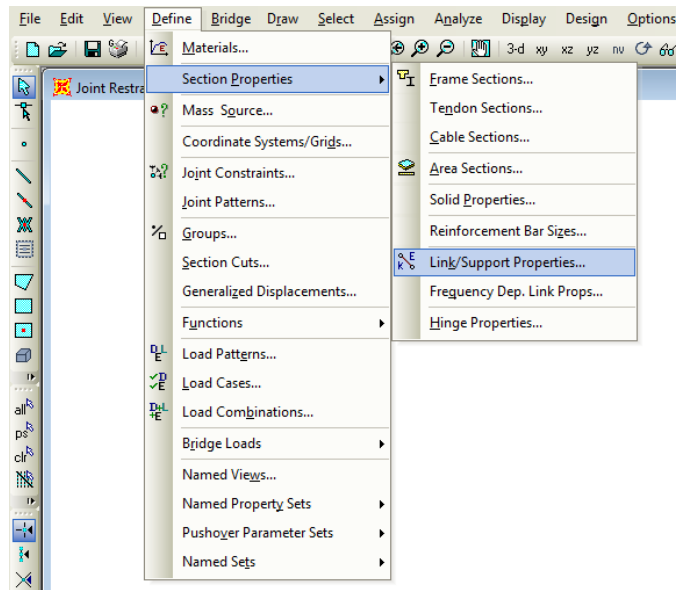


Figura 4.23 “Link/Support Properties”(SAP2000).

Podemos dibujar los “Links” de dos maneras; a base de un solo punto (“Draw 1Joint Link”) o a base de dos puntos (“Draw 2 Joint Link”), como se presenta en la figura 4.24.

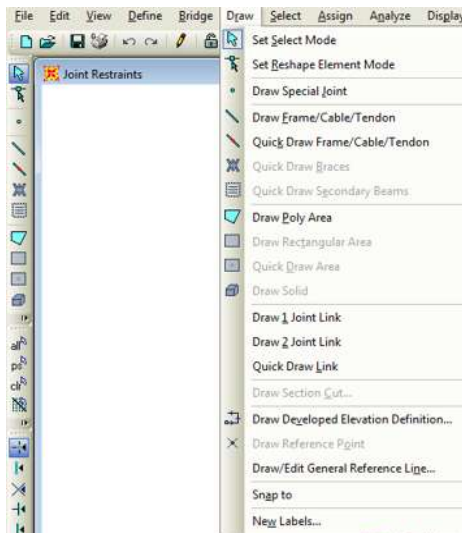


Figura 4.24 “Draw (1-2) Joint Link” (SAP2000).



Debido a que se está modelando un puente simplemente apoyado, los apoyos de cada uno de los extremos de los claros deben modelarse con un apoyo fijo y otro móvil. Esto significa iniciar con un “Link” fijo al inicio de la estructura, seguido de uno móvil al final del claro y uno fijo al inicio del siguiente claro y así sucesivamente hasta llegar al otro extremo del puente, teniendo cuidado de modelar los detalles correspondientes a la junta de dilatación, esto para representar los fenómenos de dilatación y contracción de la superestructura (figura 4.25), donde los puentes tienen juntas de dilatación formadas por placas de acero y de neopreno que pueden ser modeladas con elementos tipo “Link” en la misma forma que se definieron los apoyos de la superestructura.



Figura 4.25 Junta de dilatación de un puente
(www.registrocdt.cl/.../IMAGENES/SL380207.JPG)

De tal forma que el modelo de la junta de dilatación para el puente que se está analizando se presenta en la figura 4.26.

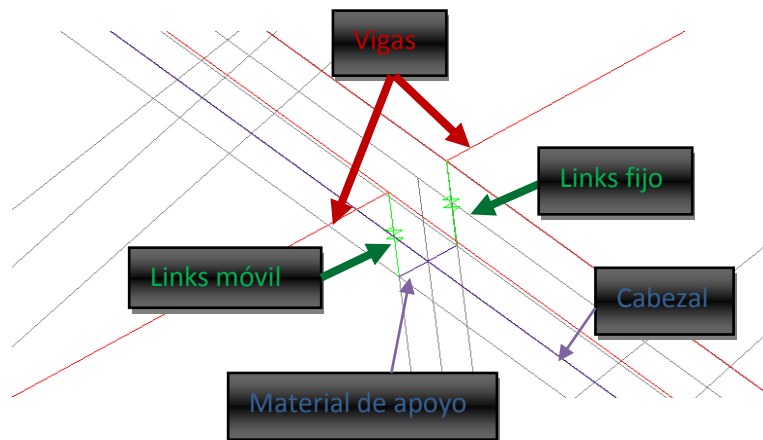


Figura 4.26 Modelo de la Juntas de dilatación (SAP2000).

4.1.2. Modelado de la superestructura

En el programa SAP2000 podemos definir cualquier tipo de sección transversal de las vigas que forman un puente, algunos tipos ya están predefinidos, como es el caso de secciones de concreto reforzado o presforzado, o se puede definir la geometría de cualquier tipo de sección transversal.

El puente Copándaro II está formado por vigas AASHTO tipo IV, el programa ya tiene definidas las características geométricas de este tipo de sección transversal.

La figura 4.27 muestra las propiedades geométricas para las vigas AASHTO tipo IV. En el programa se tienen definidos los siguientes tipos de trabes presforzadas tipo AASHTO: AASHTO I Beam-Type I, AASHTO I Beam-Type II, AASHTO I Beam-Type III, AASHTO I Beam-Type IV, AASHTO I Beam-



Tipe V, AASHTO I Beam-Tipe VI, AASHTO-PCI Bulb Tee-Type BT-54, AASHTO-PCI Bulb Tee-Type BT-63 y AASHTO-PCI Bulb Tee-Type BT-72.

Figura 4.27 Viga AASHTO tipo IV (SAP2000).

Una vez definidas las vigas del puente, se procede a determinar la sección transversal de los diafragmas, la cual será rectangular, figura 4.28. Es importante mencionar que el peralte del diafragma corresponde al peralte de la viga AASHTO tipo IV menos las distancias D2 y D6.

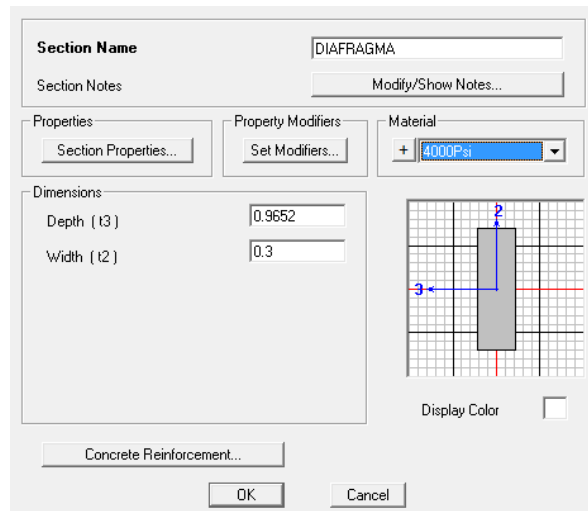


Figura 4.28 Sección transversal del diafragma (SAP2000).

Para modelar la losa de rodamiento con el programa SAP 2000, se utilizan elementos finitos tipo placas delgadas, los cuales se definen mediante los elementos tipo “Area Section” (figura 4.29) de acuerdo a el espesor de la losa. Con este tipo de elementos se modela adecuadamente el comportamiento y rigidez que aporta la losa a todo el sistema estructural.

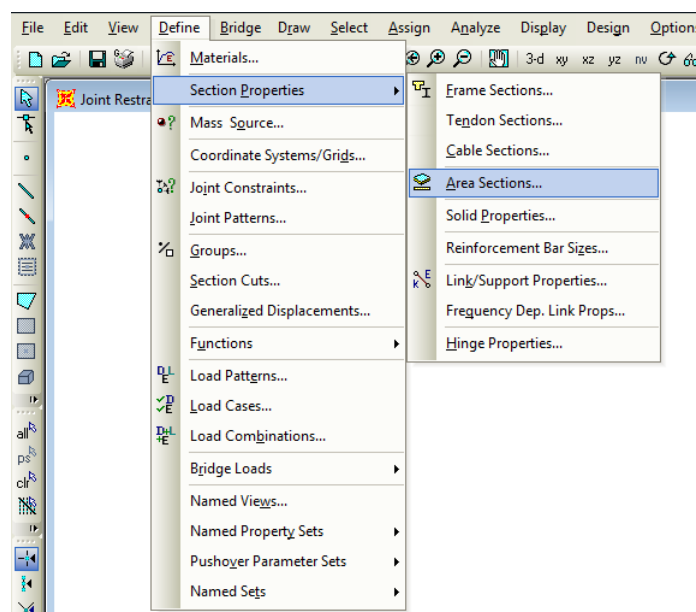


Figura 4.29 “Area Sections” (SAP2000).



La figura 4.30 muestra la ventana con las propiedades que definen los elementos de la losa de CR.

La imagen muestra la ventana de propiedades de la losa de CR en el software SAP2000. La ventana está organizada en secciones:

- Section Name:** LOSA
- Section Notes:** Botones "Modify/Show..." y "Display Color" (con un icono de color amarillo).
- Type:** Opciones de radio para seleccionar el tipo de elemento: Shell - Thin (seleccionado), Shell - Thick, Plate - Thin, Plate Thick, Membrane, y Shell - Layered/Nonlinear. Hay un botón "Modify/Show Layer Definition..." debajo.
- Material:** Material Name: + 4000Psi (con un menú desplegable), Material Angle: 0.
- Thickness:** Membrane: 0.2, Bending: 0.2.
- Concrete Shell Section Design Parameters:** Botón "Modify/Show Shell Design Parameters..."
- Stiffness Modifiers:** Botón "Set Modifiers..."
- Temp Dependent Properties:** Botón "Thermal Properties..."
- Botones "OK" y "Cancel" en la parte inferior.

Figura 4.30 Propiedades del tablero, elementos finitos (SAP2000).

Para dibujar la losa en la superestructura del puente hacemos uso de la herramienta "Draw" mostrada en la figura 4.31.

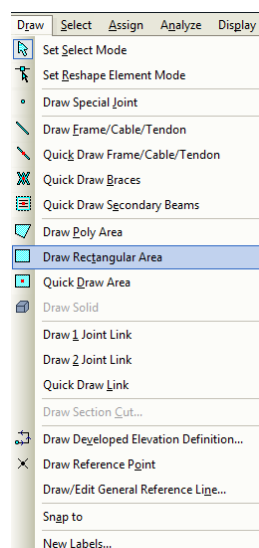


Figura 4.31 Herramienta “Draw”, para modelar la losa (SAP2000).

Es importante mencionar que la conexión de la losa con las vigas se localiza por default en el centroide de éstas, por lo que es necesario mover la conexión del tablero a la mitad del patín superior de las vigas. Para mover el punto de conexión se deben seleccionar todos los elementos tipo área correspondiente a la losa de la superestructura, como se indica en la figura 4.32.

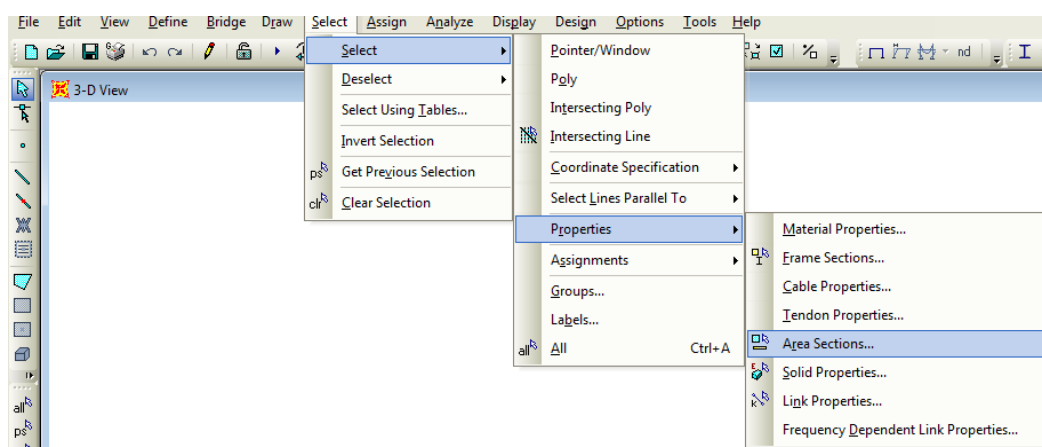


Figura 4.32 Herramienta “Select”, para losa (SAP2000).



Posteriormente se define la distancia que debe moverse el tablero para su correcta ubicación (0.6858m), utilizando la herramienta "Area Thickness Overwrites", como se presenta en las figuras 4.33 y 4.34.

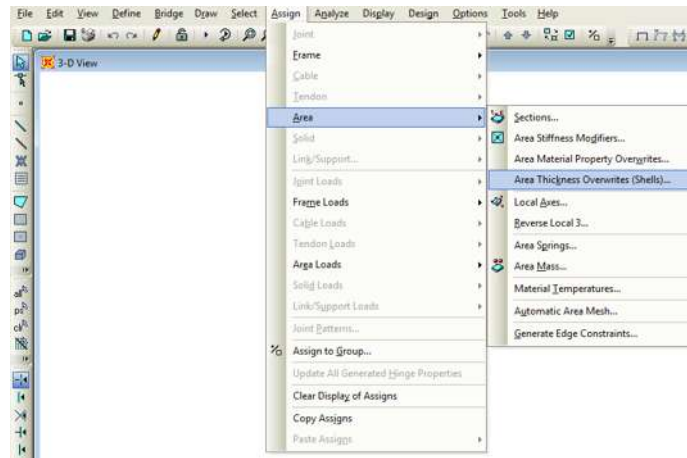


Figura 4.33 Herramienta “Area Thickness Overwrites”, para losa (SAP2000).

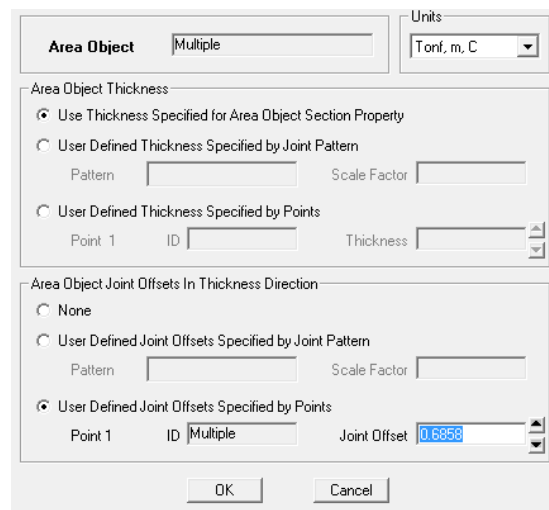


Figura 4.34 Herramienta “Area Object”, para losa (SAP2000).

Cuando los modelos se realicen con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” del SAP2000, como se verá más adelante en el capítulo 5, la losa es



modelada por default y no es necesario modificar su localización ya que esta se da automáticamente como función de los datos iniciales; lo único que se deben definir son las propiedades mecánicas del material y espesores de la sección transversal, sin tener que mover el tablero como se describió en el párrafo anterior, ya que, la herramienta “Bridge Wizard” lo realiza de forma automática.

4.1.3. Definición de la carga muerta

La carga muerta está definida por el conjunto de efectos ocasionados por el peso propio de la construcción, esto significa considerar los pesos de todos los elementos que forman parte de la estructura (elementos estructurales y no estructurales), siendo las cargas muertas y vivas las principales acciones que actúan permanentemente en cualquier tipo de construcción.

La carga muerta actuante se obtiene multiplicando los pesos volumétricos constructivos correspondientes por el volumen de los elementos. Por lo general este tipo de cargas suelen representarse por medio de cargas uniformemente distribuidas sobre las distintas áreas de la construcción, aunque también existe la posibilidad de que se modelen como cargas lineales (actuando directamente en los muros) y trabes, o cargas concentradas debidas a equipos fijos.

Es importante mencionar que en algunos casos el peso propio de los materiales es favorable a la estabilidad de la estructura, lo que es el caso de estructuras desplantadas en suelos muy blandos y compresibles. Para estos casos el RCDF proporciona dos valores de pesos volumétricos para los materiales de construcción; uno máximo cuando la carga muerta que se



presenta es desfavorable y uno mínimo cuando este es favorable, ambos casos deben modelarse y utilizarse adecuadamente en el cálculo de los elementos mecánicos y de las deformaciones esperadas, es decir estados límite de resistencia y servicio.

En los puentes, las cargas muertas provienen de: la losa, el asfalto, las guarniciones y todos los elementos estructurales considerados en el proyecto geométrico. En este ejemplo el espesor de losa es 0.20 m, y se considera un peso volumétrico del CR de 2.4 ton/m^3 ; la carpeta asfáltica tiene un espesor de 0.10 m y su peso por unidad de volumen de 2.2 ton/m^3 . Se considera para las guarniciones un peso de 0.01 ton/m^3 .

Los efectos de las cargas muertas antes mencionadas se modelan como cargas uniformemente repartidas actuando en forma tributaria en las ocho vigas que dan soporte a la superficie de rodamiento del puente. Se determinan así dos cargas por unidad de longitud correspondientes a las vigas extremas e internas que resultaron de 1.055 t/m y 0.917 t/m , respectivamente. Para designar estas cargas en las vigas, primero se seleccionan los elementos en donde se asignarán las cargas y posteriormente de la herramienta "Assign" se elige el tipo de carga que se desea asignar, figura 4.35.

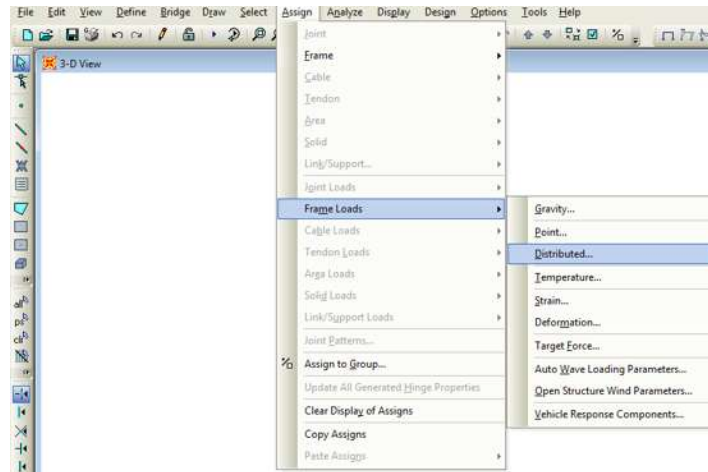


Figura 4.35 Herramienta “Assign” (SAP2000).

En seguida se asigna la masa que actúa en el puente como efecto de la carga, tal y como lo muestra la figura 4.36.

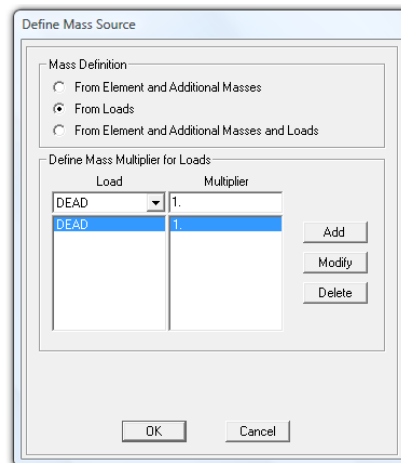


Figura 4.36 “Define Mass Source” (SAP2000).

La asignación tanto de las cargas muertas como de la masa se realizara con el mismo procedimiento cuando se utiliza la herramienta “Bridge Wizard”.



4.1.4. Definición de la carga viva

Las cargas vivas a que estará sometido el puente están definidas por los vehículos que transitan en las carreteras. Su determinación depende del peso y características geométricas de los vehículos así como de la posición más desfavorable para los elementos estructurales que forman el sistema estructural.

Para simplificar el gran número de combinaciones de vehículos que se pueden presentar en el tránsito diario sobre el puente, los códigos recurren a cargas equivalentes que representan las condiciones más desfavorables de tráfico que puedan presentarse.

Los vehículos que se consideran en el análisis de acuerdo con el código reglamentario vigente en México son: HS20, T3S3 Y T3S2R4. Estas cargas se definen con ayuda de la barra de herramientas "Define\Bridge Loads\Vehicles", figura 4.37.

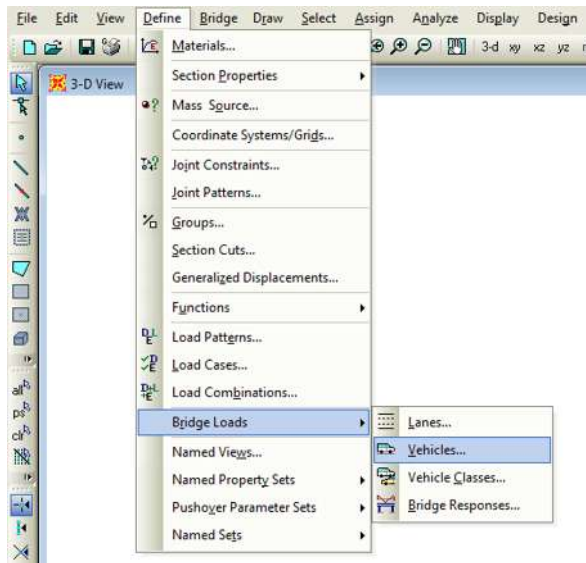


Figura 4.37 Herramienta “Vehicles” (SAP2000).

En la ventana que aparece se definen las características de los vehículos mediante la posición y peso de sus ejes, como se ilustra en las figuras 4.38, 4.39 y 4.40.

Vehicle name: Units:

Floating Axle Loads

	Value	Width Type	Axle Width
For Lane Moments	0.	One Point	
For Other Responses	0.	One Point	

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports
☒ Interior Vertical Support Forces
☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

	Value
Lane Exterior Edge	0.3048
Lane Interior Edge	0.6096

Length Effects

	Value	Modify/Show...
Axle	None	Modify/Show...
Uniform	None	Modify/Show...

Load Plan

Load Elevation

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Fixed Length	1.		0.	Zero Width		4.5	One Point	
Fixed Length	1.		0.	Zero Width		4.5	One Point	
Fixed Length	4.27		0.	Zero Width		14.515	One Point	
Fixed Length	4.27		0.	Zero Width		14.515	One Point	

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor:
☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

Figura 4.38 HS20, características (SAP2000).



Vehicle name: **T3S3** Units: **Tonf, m, C**

Floating Axle Loads

Value Width Type Axle Width

For Lane Moments: 0. One Point

For Other Responses: 0. One Point

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports

☒ Interior Vertical Support Forces

☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

Lane Exterior Edge: 0.3048

Lane Interior Edge: 0.6096

Length Effects

Axle: None Modify/Show...

Uniform: None Modify/Show...

Load Plan

Load Elevation

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Fixed Length	1.		0.	Zero Width		6.5	One Point	
Fixed Length	1.		0.	Zero Width		6.5	One Point	
Fixed Length	3.5		0.	Zero Width		9.75	One Point	
Fixed Length	1.2		0.	Zero Width		9.75	One Point	
Fixed Length	4.25		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	1.2		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	1.2		0.	Zero Width		7.5	One Point	

Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor

☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

OK Cancel

Figura 4.39 T3S3, características (SAP2000).

Vehicle name: **T3S2R4** Units: **Tonf, m, C**

Floating Axle Loads

Value Width Type Axle Width

For Lane Moments: 0. One Point

For Other Responses: 0. One Point

☐ Double the Lane Moment Load when Calculating Negative Span Moments

Usage

☒ Lane Negative Moments at Supports

☒ Interior Vertical Support Forces

☒ All other Responses

Min Dist Allowed From Axle Load

Lane Exterior Edge: 0.3048

Lane Interior Edge: 0.6096

Length Effects

Axle: None Modify/Show...

Uniform: None Modify/Show...

Load Plan

Load Elevation

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Uniform Width Type	Uniform Width	Axle Load	Axle Width Type	Axle Width
Fixed Length	1.		0.	Zero Width		4.5	One Point	
Fixed Length	1.		0.	Zero Width		4.5	One Point	
Fixed Length	3.5		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	1.2		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	4.25		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	1.2		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	3.2		0.	Zero Width		7.5	One Point	
Fixed Length	1.2		0.	Zero Width		7.5	One Point	

Add Insert Modify Delete

☐ Vehicle Applies To Straddle (Adjacent) Lanes Only Straddle Reduction Factor

☐ Vehicle Remains Fully In Lane (In Lane Longitudinal Direction)

OK Cancel

Figura 4.40 T3S2R4, características (SAP2000).



Conforme a lo establecido en la “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” (A A S H T O) las cargas de los vehículos se conocen con las designaciones H y HS. Para designar un camión de dos ejes se utiliza la letra H después de la letra se colocan un número (10,15, 20) que indica el peso en toneladas del sistema inglés (2000 lb) del camión especificado.

Las cargas designadas como HS son referidas a un camión-tractor de dos ejes con un semi-remolque de un solo eje. Los números a continuación de la H y de la S manifiestan el peso bruto en toneladas en el sistema inglés del tractor y del semirremolque, respectivamente.

Es importante mencionar que los vehículos que se consideran en el análisis por carga viva se definen con el mismo procedimiento en el “Bridge Wizard”.

4.1.5. Definición de las líneas donde circulan las cargas vivas en el puente

Definidas las características de los vehículos, se procede a determinar sus posibles líneas de acción, estas indican la posición más desfavorable de los camiones en el análisis estructural. Esto se hace con la herramienta “Lanes” como lo muestra la figura 4.41.

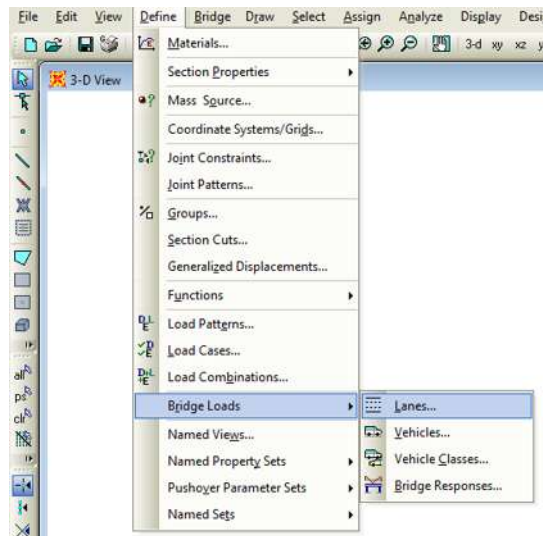
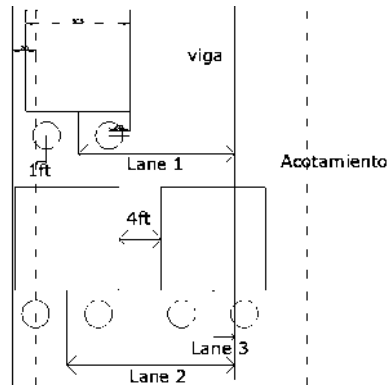


Figura 4.41 “Lanes”, con la herramienta “Bridge Loads” (SAP2000).

Se definen tres posiciones donde pueden circular los vehículos antes descritos, figura 4.42; por lo que se deben definir tres líneas de acción que representen cada una de estas posiciones (lane 1, lane 2 y lane 3), las cuales se definen con respecto a un elemento estructural, en este caso se elige a una viga de la superestructura indicada con el número que define al elemento “Frame” correspondiente al inicio y al final de la viga que forma toda la longitud del puente, figura 4.43.



a) **Figura 4.42 Líneas de acción en el puente.**

b)

Lane Name LANE1

Frame	Centerline Offset	Lane Width
92	-4.57	0
92	-4.57	0
137	-4.57	0

Add
Insert
Modify
Delete

Reverse Order Reverse Sign Move Lane...

Lane Edge Type
Left Edge Interior
Right Edge Interior

Maximum Lane Load Discretization Lengths
Along Lane 3.048
Across Lane 3.048

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane
☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 4 of Span Length
☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 10 of Lane Length

Objects Loaded By Lane
☒ Program Determined
☐ Group

Display Color ■

OK Cancel

Lane Name LANE2

Frame	Centerline Offset	Lane Width
92	-4.894	0
92	-4.894	0
137	-4.894	0

Add
Insert
Modify
Delete

Reverse Order Reverse Sign Move Lane...

Lane Edge Type
Left Edge Interior
Right Edge Interior

Maximum Lane Load Discretization Lengths
Along Lane 3.048
Across Lane 3.048

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane
☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 4 of Span Length
☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 10 of Lane Length

Objects Loaded By Lane
☒ Program Determined
☐ Group

Display Color ■

OK Cancel

c)

Lane Name LANE3

Frame	Centerline Offset	Lane Width
92	-0.625	0
92	-0.625	0
137	-0.625	0

Add
Insert
Modify
Delete

Reverse Order Reverse Sign Move Lane...

Lane Edge Type
Left Edge Interior
Right Edge Interior

Maximum Lane Load Discretization Lengths
Along Lane 3.048
Across Lane 3.048

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane
☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 4 of Span Length
☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ 10 of Lane Length

Objects Loaded By Lane
☒ Program Determined
☐ Group

Display Color ■

OK Cancel

Figura 4.43 “Lanes”; “LANE 1” (a), “LANE 2” (b) y “LANE 3” (c) (SAP2000).



En la figura 4.44 se observan las tres líneas de acción, definidas por las líneas de color azul marino, que se utilizan en el análisis de la estructura.

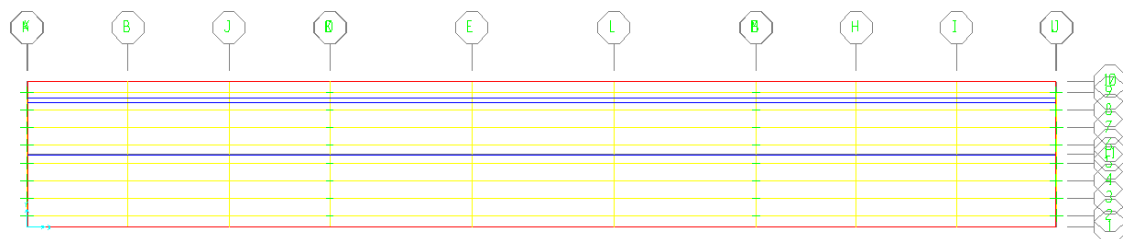


Figura 4.44 Vista en planta de las líneas de acción en la estructura (SAP2000).

En los modelos realizados con el “Bridge Wizard” las líneas de acción se definen siguiendo el mismo proceso.

4.1.6. Análisis estructural del modelo analítico del puente

Finalmente el modelo analítico del puente Copándaro II localizado en la autopista México-Guadalajara queda definido de la siguiente manera, figura 4.45 y 4.46.

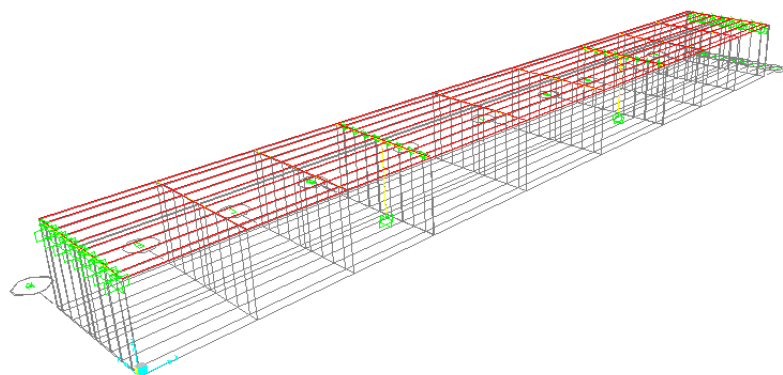


Figura 4.45 Modelo analítico del Puente Copándaro II, 3D (SAP2000).

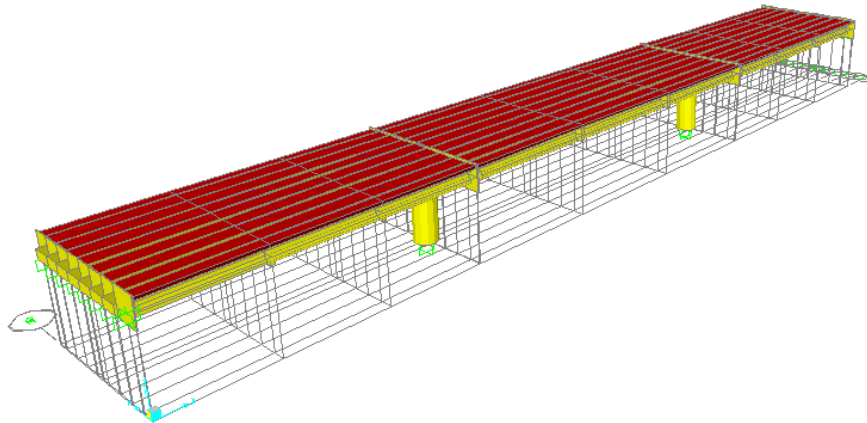


Figura 4.46 Modelo analítico del Puente Copándaro II, “Extrude View” (SAP2000).

Terminado el modelo, se procede a definir los tipos de análisis estructural que realizará el programa, con la herramienta “Load Cases” (figura 4.47); definiendo de esta manera nueve tipos de análisis para el puente, los cuales se pueden apreciar en la figura 4.48.

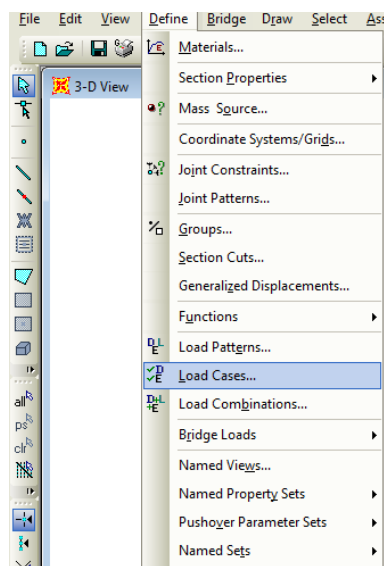


Figura 4.47 Herramienta “Load Cases” (SAP2000).

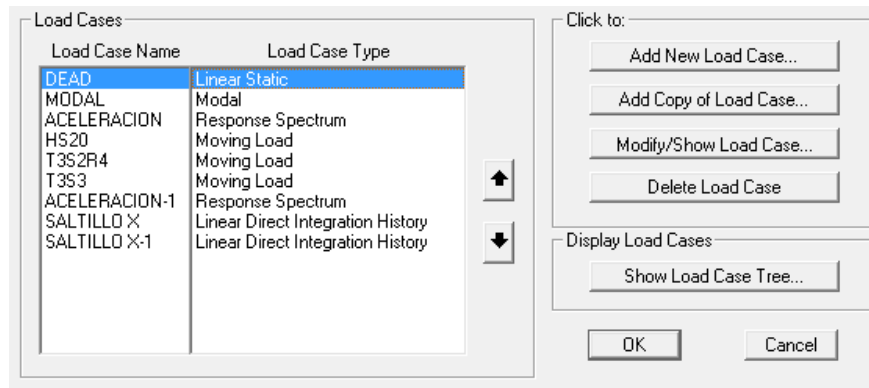


Figura 4.48 Tipos de análisis para el Puente Copándaro II (SAP2000).

En el caso de la carga muerta (DEAD), el análisis se debe exclusivamente a los efectos causados por el peso del puente. Para esto se considera que el tipo de carga es estático y el tipo de análisis lineal, con un factor de escala igual a la unidad, figura 4.49.

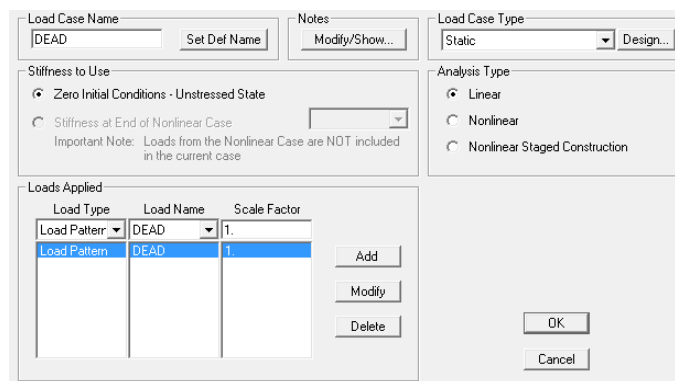


Figura 4.49 Análisis por carga muerta (SAP2000).

El análisis modal da por resultado los periodos y formas modales que presenta la estructura en sus diferentes modos de vibrar. Con base en este análisis se determinan las acciones sísmicas que pudieran actuar sobre la estructura, figura 4.50.



Figura 4.50 Análisis modal (SAP2000).

El siguiente tipo de análisis corresponde al análisis modal espectral, en donde las demandas se determinan con base del espectro de diseño, el cual está en función de la zona sísmica de la República Mexicana; zona A, zona B, zona C y zona D así como del tipo de suelo; I (terreno firme), II (terreno de transición) y III (terreno compresible). La definición del espectro de diseño es mediante la utilización del programa “PRODICIS”, el cual se determina conociendo la ubicación exacta de la estructura, definida con su longitud y latitud, como se presenta en la figura 4.51.

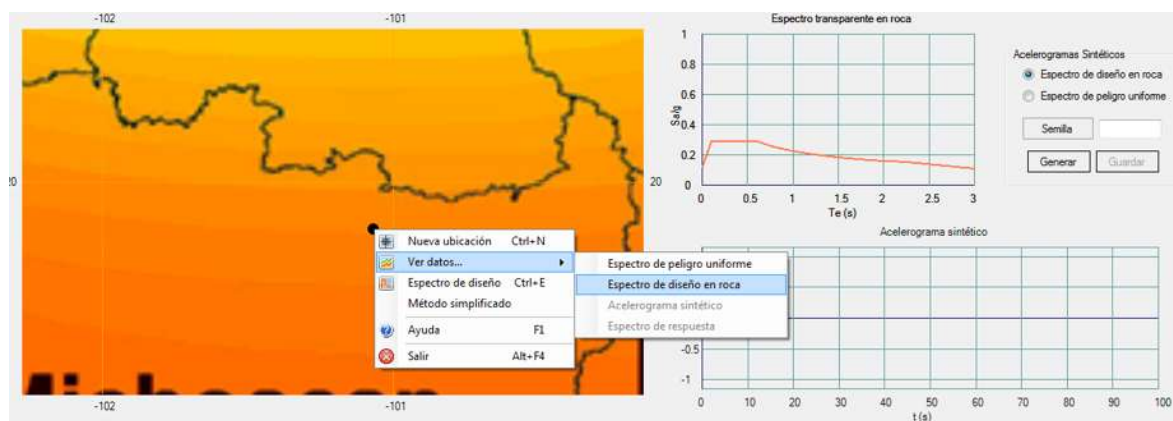


Figura 4.51 Espectro de diseño para el Puente Copándaro II (PRODICIS).



Para obtener la información del espectro, sólo bastará dar un clic derecho sobre la localización del lugar en el mapa, la información se maneja en archivo “txt” (figura 4.52) para que el SAP2000 pueda leer y almacenar el archivo, esto se realiza mediante la función “Response Spectrum”.

De los archivos se agrega la nueva función con un coeficiente de amortiguamiento de 0.05, omitiendo la línea de cabecera sin información numérica, especificando la forma en que se presenta dicha información, periodo vs valor o frecuencia vs valor; se despliega así el espectro de diseño, el cual se debe de convertir a la definición del usuario (“convert to user defined”), para que el archivo se encuentre disponible en el modelo y no sólo en la memoria de la “PC”. El procedimiento anterior se presenta en el diagrama de flujo de la figura 4.53.

T(seg)	Sa(1/g)
0	0.1139
0.1	0.2848
0.6	0.2848
0.7	0.2636
0.8	0.2466
0.9	0.2325
1	0.2206
1.1	0.2103
1.2	0.2014
1.3	0.1935
1.4	0.1864
1.5	0.1801
1.6	0.1744
1.7	0.1692
1.8	0.1644
1.9	0.16
2	0.156
2.1	0.1546
2.2	0.1513
2.3	0.1467
2.4	0.1414
2.5	0.1358
2.6	0.13
2.7	0.1242
2.8	0.1186
2.9	0.1131
3	0.1078
3.1	0.1028
3.2	0.0981

Figura 4.52 Espectro de diseño para el Puente Copándaro II en archivo “txt”.

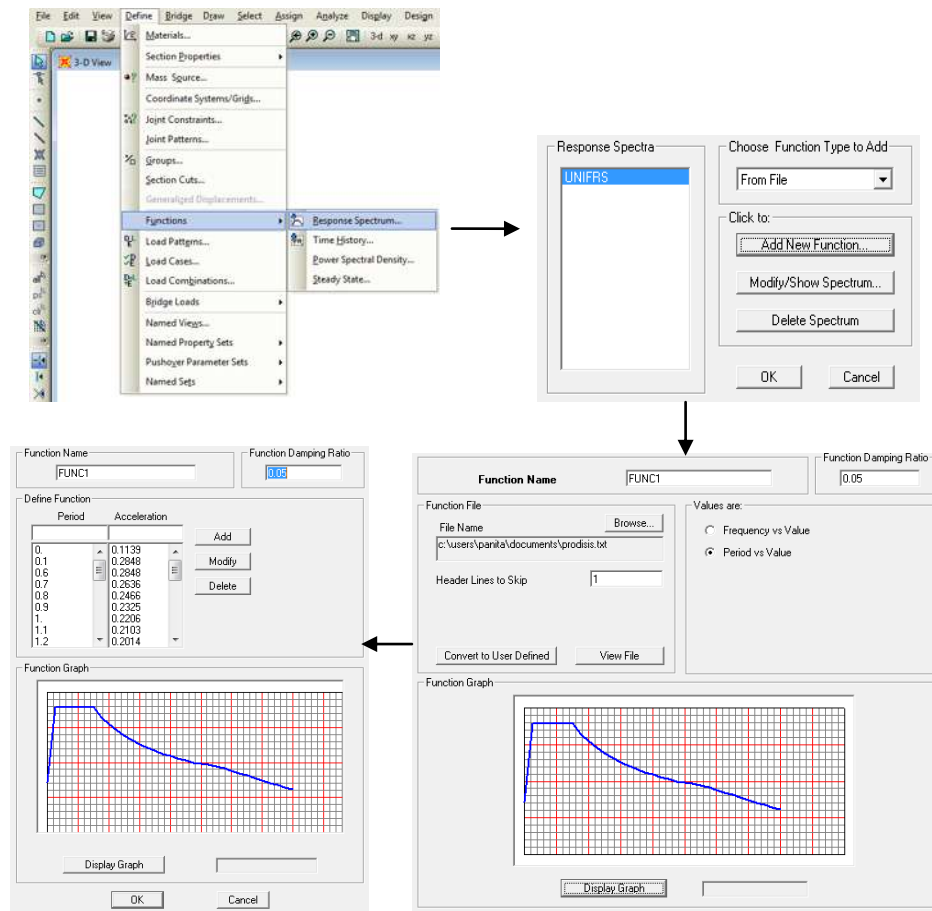


Figura 4.53 Espectro de diseño (SAP2000).

Se procede a realizar el análisis de la estructura por efectos del espectro de diseño, ya definido anteriormente. Para este análisis se consideran dos casos de carga, de acuerdo con lo especificado en el RCDF; “ACELERACIÓN” y “ACELERACIÓN-1”. En el primer caso, se consideran los efectos del sismo actuando 100% en la dirección x (u_1) y 30% en la dirección y (u_2), mientras que en el segundo caso se evalúa la consideración contraria, es decir, 30% en la dirección x (u_1) y 100% en la dirección y (u_2). Debido a que los valores del espectro de diseño se encuentran divididos por la gravedad (figura 4.52) se considera un factor de escala 9.81, así como un coeficiente de amortiguamiento de 0.05. Estas consideraciones se ilustran en la figura 4.54.



La imagen muestra dos ventanas de configuración de casos de carga en el software SAP2000. Ambas ventanas están configuradas para un análisis de espectro de diseño.

Configuración de la ventana izquierda:

- Load Case Name:** ACELERACION
- Load Case Type:** Response Spectrum
- Modal Combination:**
 - ☒ CQC
 - ☐ SRSS
 - ☐ Absolute
 - ☐ GMC
 - ☐ NRC 10 Percent
 - ☐ Double Sum
- Directional Combination:**
 - ☒ SRSS
 - ☐ Absolute
- Modal Load Case:** Use Modes from this Modal Load Case (MODAL)
- Loads Applied:**

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	FUNC1	9.81
Accel	U2	FUNC1	2.943
- Other Parameters:** Modal Damping: Constant at 0.05

Configuración de la ventana derecha:

- Load Case Name:** ACELERACION-1
- Load Case Type:** Response Spectrum
- Modal Combination:**
 - ☒ CQC
 - ☐ SRSS
 - ☐ Absolute
 - ☐ GMC
 - ☐ NRC 10 Percent
 - ☐ Double Sum
- Directional Combination:**
 - ☒ SRSS
 - ☐ Absolute
- Modal Load Case:** Use Modes from this Modal Load Case (MODAL)
- Loads Applied:**

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	FUNC1	2.943
Accel	U2	FUNC1	9.81
- Other Parameters:** Modal Damping: Constant at 0.05

Figura 4.54 Análisis debido al espectro de diseño de la estructura (SAP2000).

El análisis por efectos de las cargas vivías, es decir, debido a los efectos que provocan los vehículos; HS20, T3S3 y T3S2R4 al circular por el puente en las líneas de acción previamente definidas ("LANE1", "LANE2" y "LANE3"); para cada vehículo circulando por cada una de las líneas de acción, todos con un factor de escala igual a la unidad, figura 4.55.



Modelos analíticos de puentes carreteros

The figure displays three screenshots of the SAP2000 software interface, specifically the 'Load Case' dialog box, for different load cases: HS20, T353, and T352R4.

Load Case HS20:

- Load Case Name: HS20
- Load Case Type: Moving Load
- Stiffness to Use: Zero Initial Conditions - Unstressed State
- MultiLane Scale Factors: Number of Lanes Loaded: 1, Reduction Scale Factor: 1
- Loads Applied: Assign Number: 1, Vehicle Class: HS20, Scale Factor: 1, Min Loaded Lanes: 0, Max Loaded Lanes: 0, Lanes Loaded: All
- Lanes Loaded for Assignment 1: LANE1, LANE2, LANE3

Load Case T353:

- Load Case Name: T353
- Load Case Type: Moving Load
- Stiffness to Use: Zero Initial Conditions - Unstressed State
- MultiLane Scale Factors: Number of Lanes Loaded: 1, Reduction Scale Factor: 1
- Loads Applied: Assign Number: 1, Vehicle Class: T353, Scale Factor: 1, Min Loaded Lanes: 0, Max Loaded Lanes: 0, Lanes Loaded: All
- Lanes Loaded for Assignment 1: LANE1, LANE2, LANE3

Load Case T352R4:

- Load Case Name: T352R4
- Load Case Type: Moving Load
- Stiffness to Use: Zero Initial Conditions - Unstressed State
- MultiLane Scale Factors: Number of Lanes Loaded: 1, Reduction Scale Factor: 1
- Loads Applied: Assign Number: 1, Vehicle Class: T352R4, Scale Factor: 1, Min Loaded Lanes: 0, Max Loaded Lanes: 0, Lanes Loaded: All
- Lanes Loaded for Assignment 1: LANE1, LANE2, LANE3

Figura 4.55 Análisis debido al movimiento de los vehículos (SAP2000).

El último tipo de análisis que se considera en el modelo es debido al sismo. El acelerograma que se considera en este análisis es el que se registró en Manzanillo el 9 de Octubre de 1995 a las 9:36 A.M tiempo local, con epicentro localizado a 19.25°N y 104. 19°W.

El archivo se utiliza en formato “txt”, para que el SAP2000 pueda hacer la lectura del acelerograma utilizamos la herramienta “Time History” muy parecida a la herramienta “Response Spectrum”, el modo de proceder se presenta en el diagrama de flujo, figura 4.56.

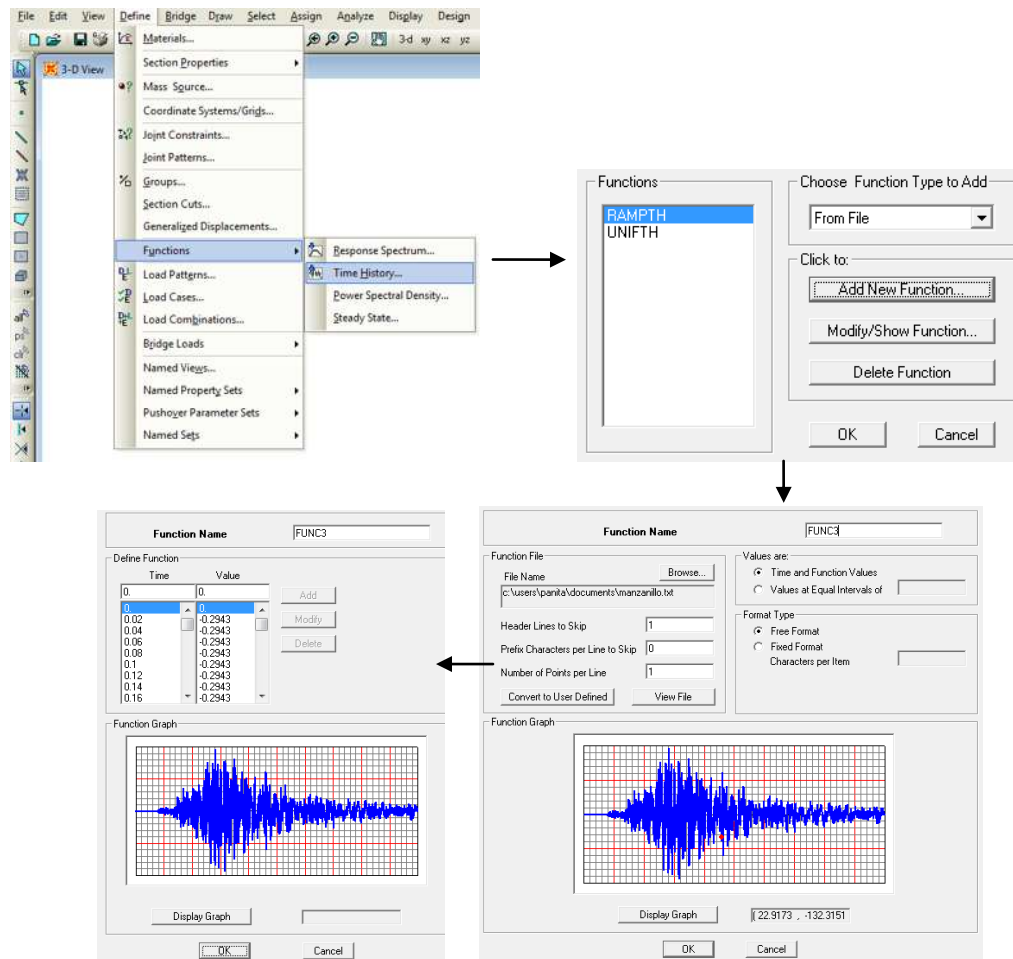


Figura 4.56 Acelerograma (SAP2000).

Para el análisis debido al acelerograma; “MANZANILLOX” y “MANZANILLOX-1” se hacen las mismas consideraciones que propone el RCDF, las cuales se describieron previamente para el espectro de diseño. El análisis en las dos consideraciones es lineal, por integración directa; el acelerograma cuenta con 2,501 renglones de datos a cada 0.02 segundos. Estas consideraciones se presentan en la figura 4.57.



Modelos analíticos de puentes carreteros

Figura 4.57 Análisis debido al acelerograma (SAP2000).

Los coeficientes proporcionales para la masa y la rigidez, se deben de calcular para este tipo de análisis. Estos coeficientes están en función del primer y segundo periodo de vibrar de la estructura obtenidos del análisis modal, así como del amortiguamiento del concreto 0.05. Los coeficientes calculados por el software son los que se presentan en la figura 4.58.

Figura 4.58 Coeficientes proporcionales para la masa y la rigidez; (a) “MANZANILLOX” y (b) “MANZANILLOX-1” (SAP2000).



En la figura 4.59 se muestra la forma de iniciar el análisis del puente modelado, se selecciona el tipo o los tipos de análisis que el usuario desea o no desea correr.

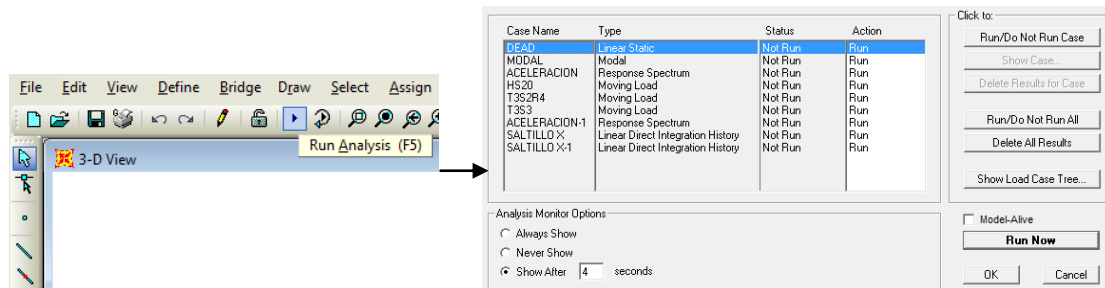


Figura 4.59 Inicio de análisis de la estructura (SAP2000).

4.2. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muro

En el capítulo 4.1 se describió la forma de modelar un puente tomando en cuenta todos aquellos factores que intervienen para que este modelo represente, de manera muy aproximada, el comportamiento real de la estructura. En este apartado se describe el desarrollo del modelo analítico del Puente Copándaro II.

A continuación, se modela el mismo puente carretero descrito en la sección previa, donde se reemplazan solamente las columnas de 1.9 m de diámetro que se encuentran soportando cada claro, por pilas tipo muro de concreto reforzado con un espesor 0.75 m. Al sustituir las columnas por muros en el puente, se desea conocer qué modelo analítico tiene la respuesta estructural que más se acerca a la respuesta real de la pila tipo muro al modificar el modelo analítico seleccionado para representar su subestructura, elementos tipo barra vs elementos finitos, respetando los detalles concernientes a sus apoyos y conexiones con la superestructura. El modelo



representa una forma idealizada del comportamiento estructural del puente ante los mismos factores que se describieron en el capítulo 4.1 y que se seguirán tomando en cuenta para los capítulos 4.2, 4.3, 5.1, 5.2 y 5.3; acción de cargas (vivas, muertas y accidentales), participación de las masas, vehículos de diseño y líneas de acción de los mismos.

4.2.1. Modelado de la subestructura

Como se mencionó antes, en este apartado sólo se describe el modelo de la subestructura del puente, ya que para el modelado de sus componentes restantes se sigue exactamente los procedimientos descritos en las secciones anteriores. Para el modelado de muros se realizan dos tipos de modelos: mediante elementos tipo barra y mediante elementos finitos, quedando definidos los muros en dos formas totalmente diferentes.

En el primer modelo se definen los muros con elementos tipo “Frame” con un espesor de 0.75 m y un ancho de 4.8 m proporcionándole a dicho elemento seis grados de libertad por cada nodo, tres de traslación y tres de rotación en cada uno de los ejes locales (capítulo 4.1.1). Las figuras 4.60 y 4.61 presentan el modelo final del puente.

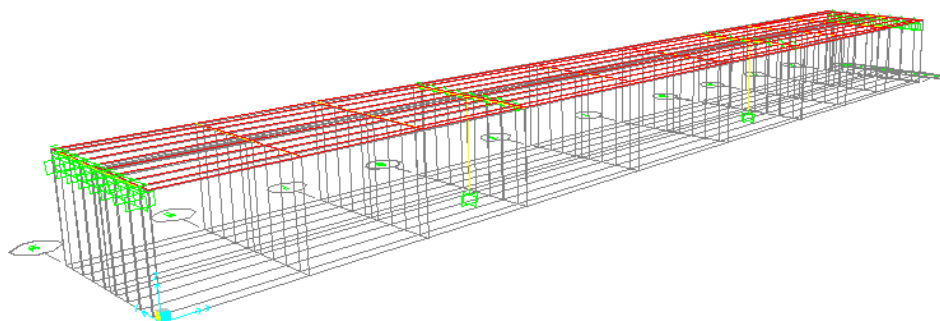


Figura 4.60 Modelo analítico del Puente Copándaro II con pilas tipo muro (elementos tipo “FRAME”), 3D (SAP2000).

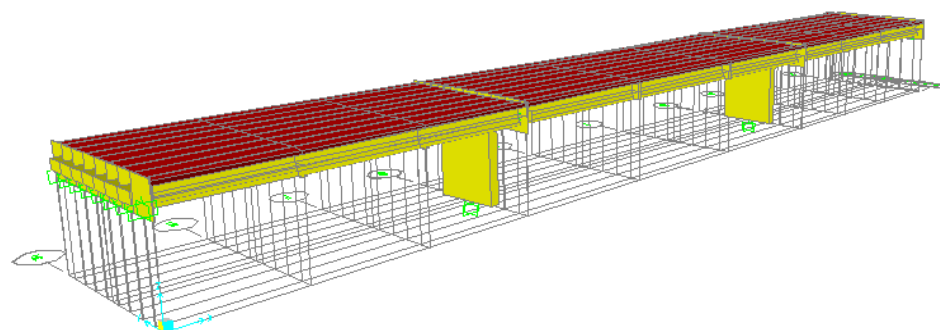


Figura 4.61 Modelo analítico del Puente Copándaro II con pilas tipo muro (elementos tipo “FRAME”), “Extrude View” (SAP2000).

Para el segundo modelo los muros intermedios del puente están constituidos por cabezales de sección variable a lo ancho de la superestructura. Las pilas tipo muro se definen como elementos finitos tipo placas delgadas (“Shell-Thick”) con espesor de 0.75 m dibujados con la herramienta “Draw Poly Area”, figura 4.62.

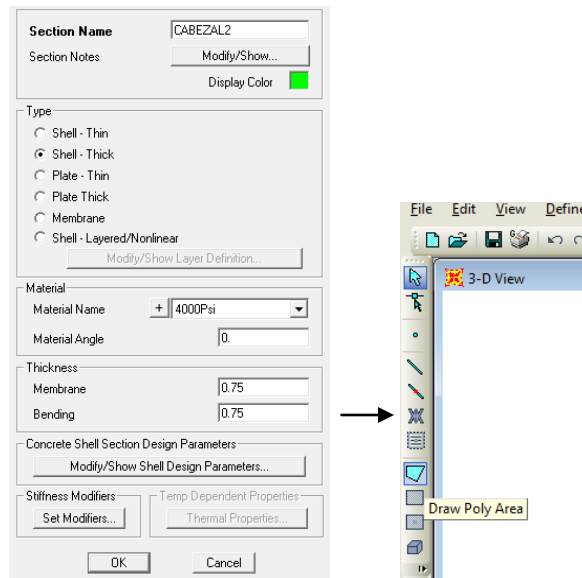


Figura 4.62 Elementos finitos tipo “Shell-thick” (SAP2000).

En la figura 4.63 se observan las características geométricas de la sección transversal del muro (en centímetros) que se modela.

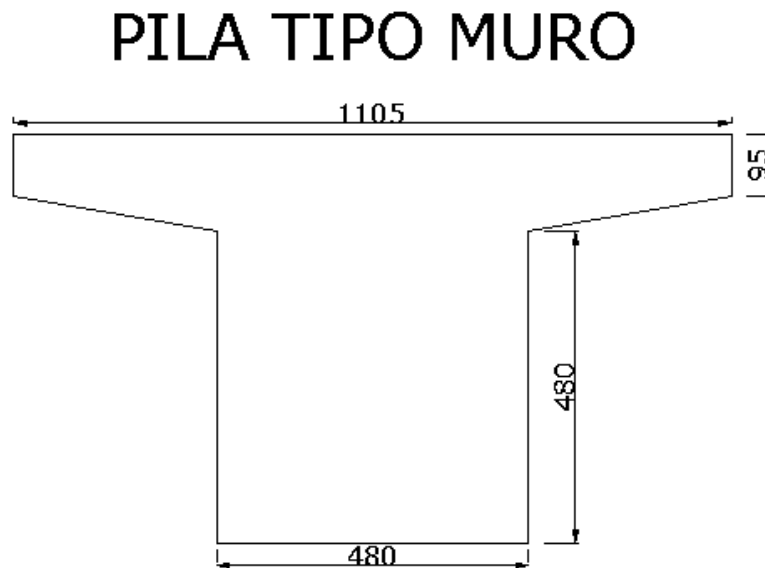


Figura 4.63 Geometría de muros intermedios.



Para que el comportamiento estructural del muro represente de mejor manera el comportamiento real de la estructura, se deben dividir las áreas de la sección transversal a un tamaño adecuado; esto se hace seleccionando el área que se desea dividir con ayuda de la herramienta “Divide Areas” para posteriormente determinar el número de áreas en que se desea dividir el elemento. En este caso se dividen las dos áreas extremas en ocho, mientras que la central se divide en 12 partes. En la figura 4.64 se ilustra la forma de proceder una vez seleccionada el área que se desea dividir.

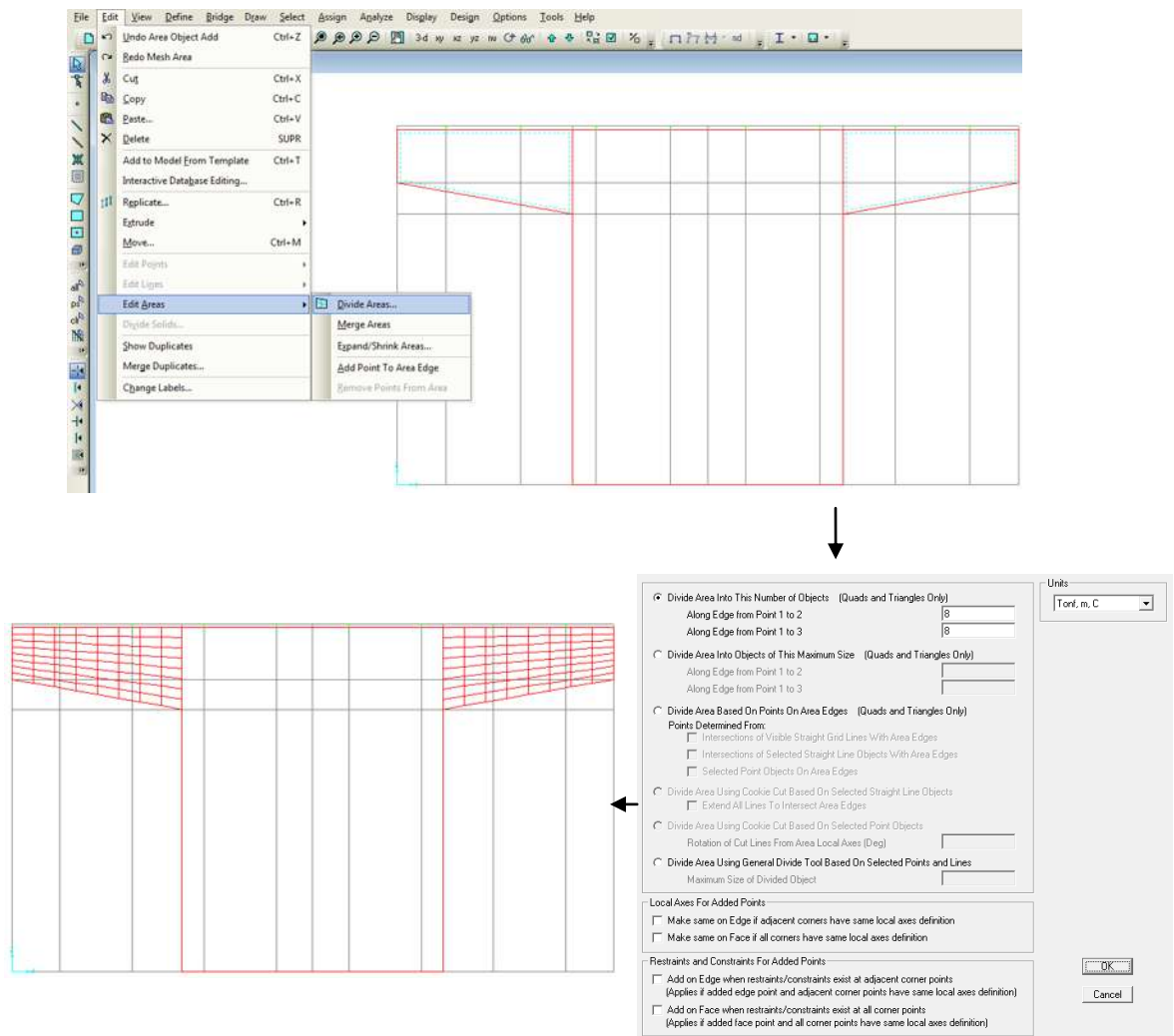


Figura 4.64 División de las áreas de los muros intermedios (SAP2000).



Finalmente la sección transversal del muro queda de la siguiente forma, figura 4.65.

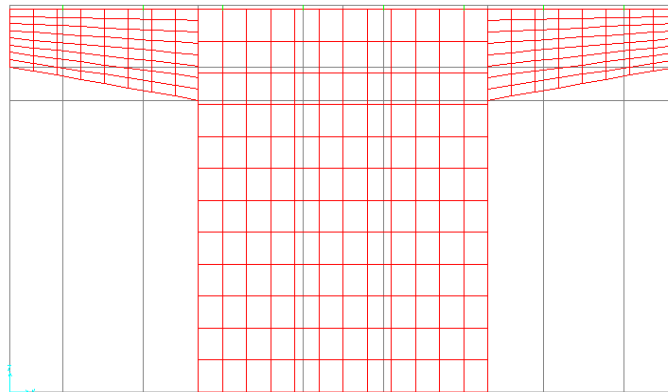


Figura 4.65 Áreas de la sección transversal de los muros intermedios (SAP2000).

Para que exista la conexión entre el muro y la superestructura del puente, es necesario que los nodos de cada uno de los “Links” estén conectados con los nodos de las áreas antes definidas, para ello se tiene que realizar una subdivisión más de las áreas, en los elementos donde el nodo del “Link” no coincida con el nodo del área.

La figura 4.66 presenta una forma de realizar el proceso anterior; se identifican los “Links” que se desean conectar con el muro, se seleccionan las áreas que no coinciden con los “Links” (desde la parte superior hasta la parte inferior del muro) con ayuda de la herramienta “Select using Intersecting Line”, finalmente con la herramienta “Divide Areas” se hace la conexión entre los dos elementos.

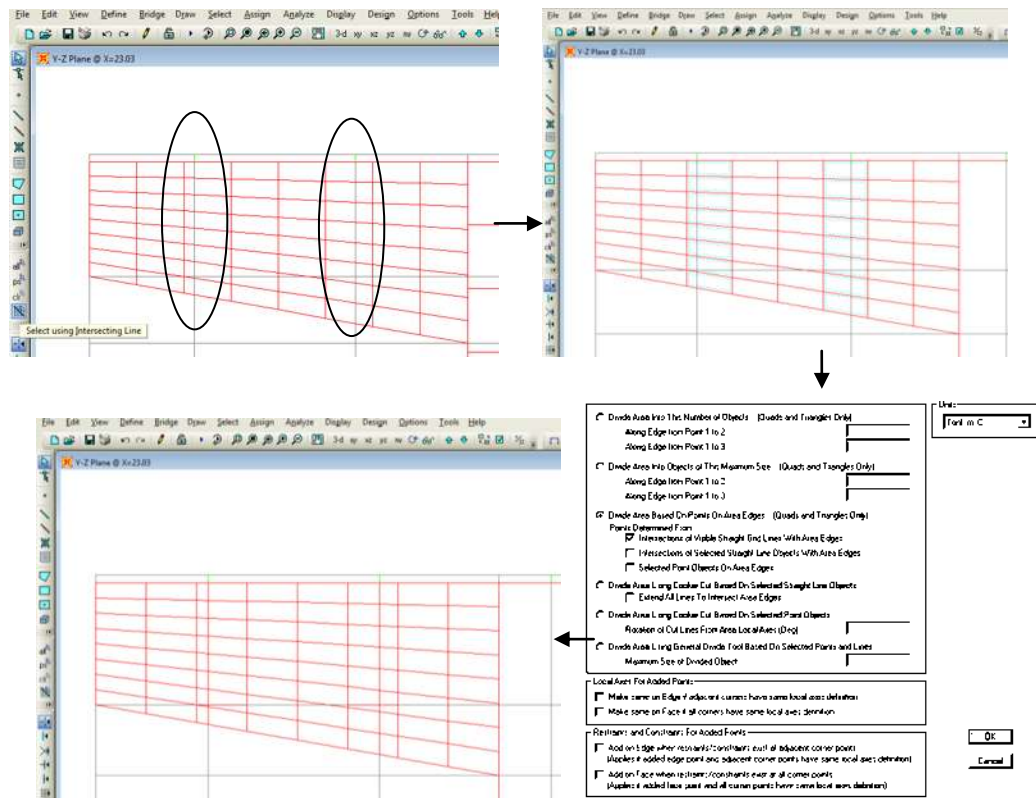


Figura 4.66 Conexión entre los “Links” y los muro intermedio (SAP2000).

Una vez realizadas todas las conexiones necesarias entre los “Links” y la pila tipo muro, se procede a definir las conexiones entre los elementos del muro (áreas) y el suelo, se determina para ello que en las conexiones no existan la traslación ni la rotación, por lo que la conexión se define como empotrada, figura 4.67.

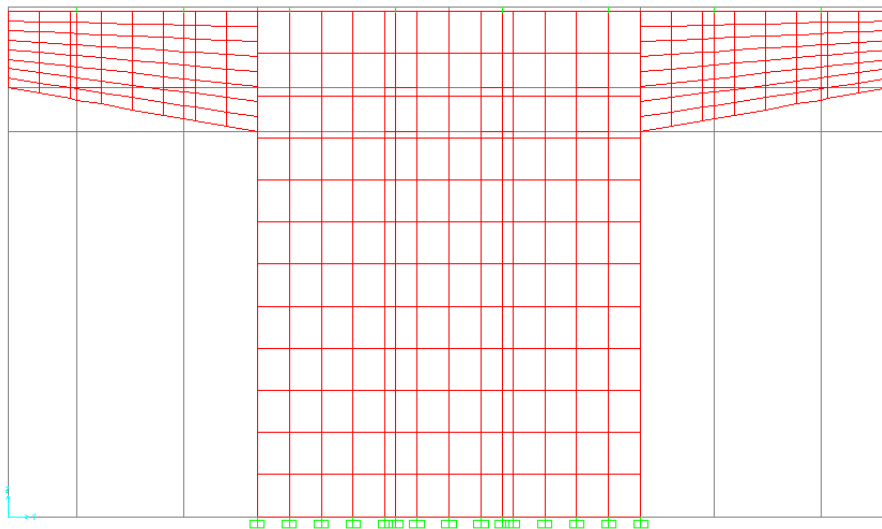


Figura 4.67 Conexión entre el suelo y los elementos de los muros intermedios (SAP2000).

La sección transversal de los muros extremos del puente tiene una sección transversal diferente a la geometría de los muros intermedios; los muros extremos abarcan todo lo ancho de la superestructura del puente; sin embargo, se modelan de la misma forma como se modelaron los muros intermedios. La conexión de los “Links” con los elementos de los muros es diferente a la que se definió antes; se restringe el movimiento de traslación en los tres ejes (“Translation 1”, “Translation 2” y “Translation 3”) y sólo se restringe el movimiento de rotación alrededor del eje 3 (“Rotation about 3”).

La figura 4.68 muestra la sección transversal de los muros extremos del puente, así como sus correspondientes conexiones con la superestructura del puente y el suelo.

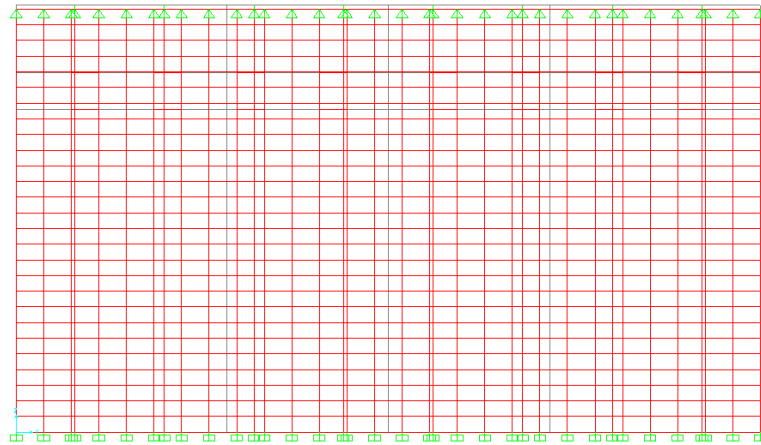


Figura 4.68 Muros extremos del Puente Copándaro II (SAP2000).

El segundo modelo con pilas tipo muro modelado con elementos finitos tipo “Shell-Thick”, se presenta en las figuras 4.69 y 4.70.

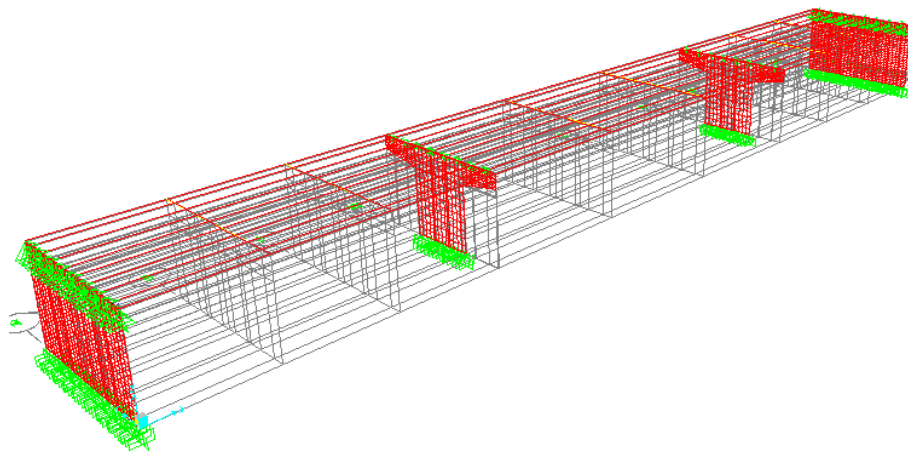


Figura 4.69 Modelo analítico del Puente Copándaro II con pilas tipo muro (elementos finitos tipo “Shell-Thick”), 3D (SAP2000).

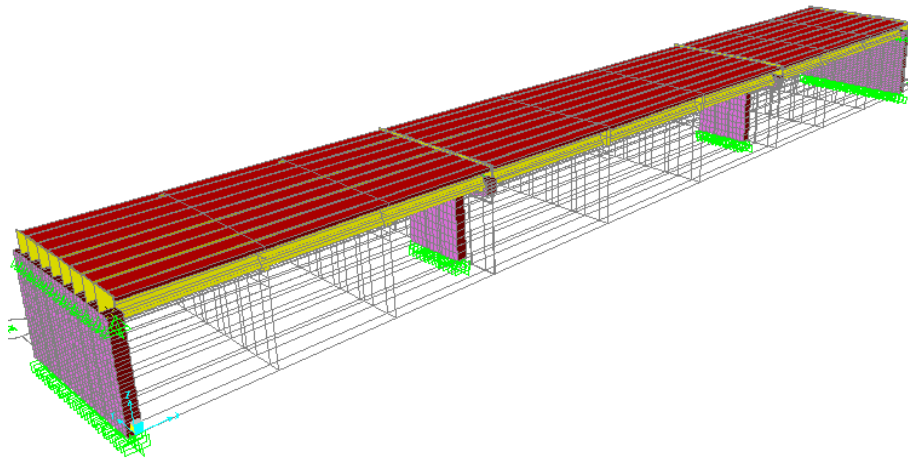


Figura 4.70 Modelo analítico del Puente Copándaro II con pilas tipo muro (elementos finitos tipo “Shell-Thick”), Extrude View (SAP2000).

4.3. Puente continuo sobre apoyos de neopreno

Los puentes continuos son aquellos puentes que no están constituidos por juntas de dilación en la superficie de rodamiento, por lo que las condiciones de apoyo que presentan estas estructuras son diferentes a las expuestas para los puentes simplemente apoyados.

Para modelar el puente Capándaro II como estructura continua, es necesario eliminar la sección transversal que sirve de apoyo para proporcionar la conexión adecuada entre el cabezal-“Link”-trabe que se definió en el capítulo 4.1.1 (figura 4.21) para el puente simplemente apoyado, ya que ésta sección se ubica en las juntas de dicha estructura sobre el cabezal.

Las conexiones que se realizan entre la superestructura y la subestructura del puente son diferentes en este modelo; sólo es necesario



contar con “Links” fijos en el extremo del puente y móviles en el resto de las conexiones, figura 4.71.

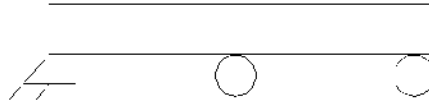


Figura 4.71 Simplificación matemática para puentes continuos.

El modelo del Puente Copándaro II como estructura continua no presenta un cambio perceptible del modelo analítico con respecto del correspondiente al puente simplemente apoyado, por lo que se omiten las figuras correspondientes a los pasos a seguir para desarrollar el modelo.

Capítulo V

5. Modelos 3D con la herramienta Bridge Wizard del software SAP2000

La herramienta “Bridge Wizard” del SAP 2000, es un módulo del software que permite modelar diferentes tipos de puentes, donde se genera de manera automática la geometría del puente una vez definidos todos los elementos que lo componen, los datos se incorporan por medio de ventanas que agrupan información relativa a cada una de las partes que conforman un puente. El modelo analítico se forma utilizando elementos tipo “Frame”, “Shell”, “Area” y “Link”. Para el proceso se definen diferentes parámetros clasificados con los nombres de “Layout Line”, “Deck Section”, “Diaphragm”, “Restrainers”, “Bearings”, “Abutments”, “Bents”, “Bridge Objects” y “Update Linked Bridge Model” los cuales serán descritos y utilizados a detalle más adelante.



Una forma adecuada de proceder consiste en crear un primer modelo y posteriormente mejorarlo.

En caso de ser necesario, ya que si se omite la definición de algún parámetro, la herramienta “Bridge Wizard” utiliza valores que son asignados automáticamente por el programa, los cuales pueden modificarse posteriormente. Las herramientas que se utilizan para modelar un puente con la herramienta “Bridge Wizard” se muestran en la figura 5.1.

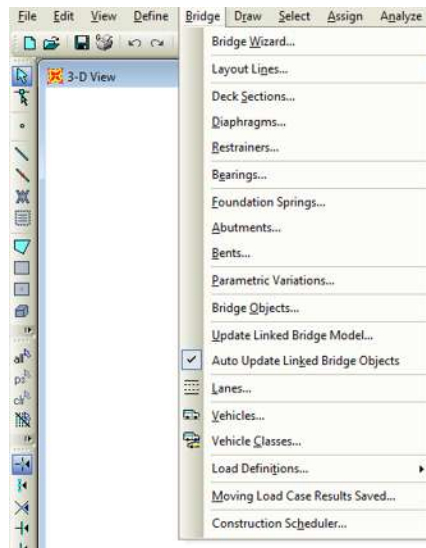


Figura 5.1 Herramienta “Bridge Wizard” (SAP2000).

5.1. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas con columnas

Para realizar los modelos analíticos con la herramienta “Bridge Wizard”, se tomarán en cuenta los factores y aspectos que se mencionaron en el capítulo 4.1, para que los modelos sean representativos del puente real.



Para ejemplificar el uso de esta herramienta, se describe el proceso del modelo analítico para el puente Copándaro II, el cual se explica a continuación detalladamente el modelado de la subestructura y superestructura del puente.

5.1.1. Definición de la geometría del puente

Podemos iniciar el modelo analítico del puente definiendo su alineación horizontal y vertical, mediante estaciones que definan la distancia donde se presentan irregularidades o cambios en la geometría del puente a través de la herramienta “Layout Lines” (diseño de líneas). Las líneas pueden ser rectas, inclinadas o curvas, tanto en dirección horizontal como en la vertical. Las curvas horizontales pueden modelarse con trayectoria circular o con espirales, si la estructura así lo requiere. El modelo que se utiliza para las curvas verticales es del tipo parabólico. Para el caso de estudio se requieren variaciones lineales tanto horizontales (78.31 m) como verticales (11.05 m), debido a la geometría del puente.

Para definir la alineación horizontal se especificará la estación inicial y la estación final de la línea, inicio y fin del puente (figura 5.2), así como el tipo de línea, “Quick Start”, figura 5.3.



Figura 5.2 “Layout Lines”, definición (SAP2000).

Figura 5.3 “Layout Lines-Quick Start” (SAP2000).

Al finalizar la alineación horizontal del puente, el programa automáticamente muestra una línea recta, con una longitud de 78.31 m, figura 5.4.

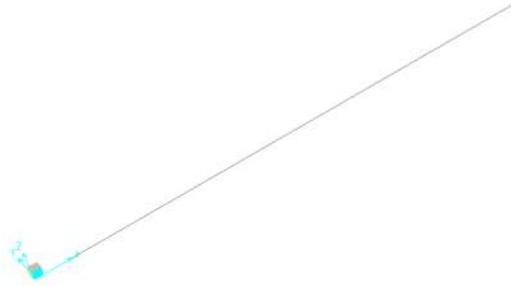


Figura 5.4 Alineación horizontal del puente (SAP2000).

5.1.2. Sección transversal del puente

La herramienta “Deck Sections” se utiliza para definir la superestructura del puente, es decir cómo está compuesta la sección transversal del puente. En este ejemplo se tiene una superestructura formada por elementos prefabricados (Precast I Girder).

En la ventana correspondiente se elige la sección adecuada, en donde se define su geometría, por ejemplo se modifica el número de vigas interiores a 6 para tener una sección formada por 8 vigas tipo AASHTO; se especifica el ancho total del puente que es 11.05 m; el espesor de losa (t_1 y t_2) de 0.2 m para que el espesor sea constante en todo lo ancho del tablero; se define la sección transversal de las vigas, en este caso son tipo IV, y por último se especifican las distancias exteriores del tablero a centro de las dos vigas extremas (L_1 y L_2) para su correcta localización.

En el caso de las propiedades que no apliquen al caso en estudio se asignará un valor igual a 0.



En la figura 5.5 podemos observar del lado izquierdo la sección tipo con las definiciones de los parámetros en que se basa el programa para definir la geometría del caso a modelar, en el lado derecho de la ventana del programa presenta las modificaciones que se hicieron a la geometría.

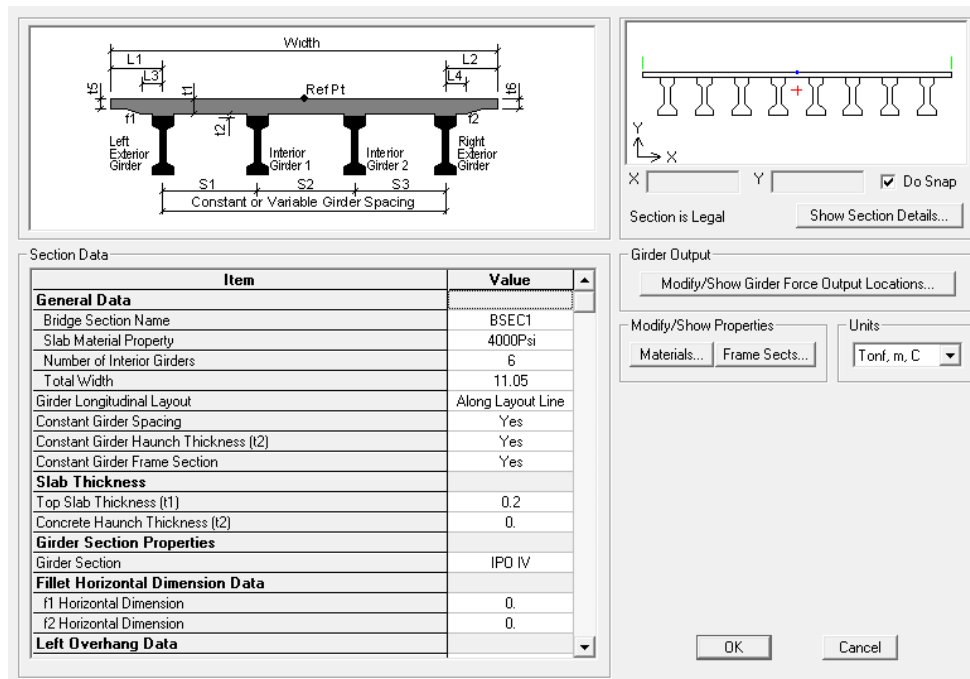


Figura 5.5 Sección transversal de la superestructura (SAP2000).

5.1.3. Diafragmas

Con la herramienta “Diaphragms” se define la propiedad de los diafragmas que existen en el puente, también se utiliza para especificar la geometría de estos elementos y el modelo que se adoptará (barras o elementos finitos). El material del que estén hechos los diafragmas pueden ser de concreto reforzado, de acero o de cualquier otro material.



Para el modelo del puente Copándaro II, se define un diafragma sólido (corresponde a un modelo de elementos finitos en 3D), aplicable sólo para puentes de concreto de 0.3 m de espesor, figura 5.6.

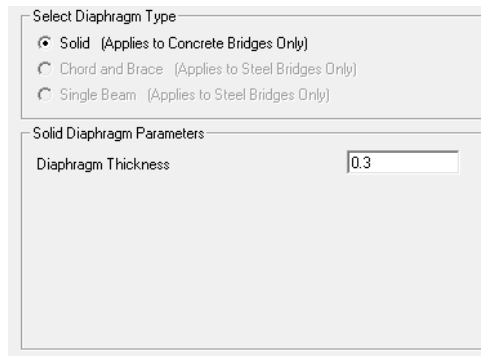


Figura 5.6 Diafragma sólido (SAP2000).

Una vez definidas las propiedades de los diafragmas, éstos se asignarán con la herramienta “Bridge Object”, como a continuación se describe.

5.1.4. Restricciones

Las restricciones se realizan con ayuda de la herramienta “Restrainers” y pueden ser asignadas en estribos, en las pilas y en cualquier nodo donde la superestructura es discontinua, como en las vigas que la constituyen debido a que el puente que se modela corresponde a una estructura simplemente apoyada.

Para modelar adecuadamente las conexiones que existen entre la losa, las vigas y los apoyos de neopreno, se definen tres tipos de restricciones diferentes en las vigas que forman la superestructura; la primera (superior)



representa la rigidez proporcionada por las vigas, la segunda (intermedia) representa la rigidez aportada por las placas de neopreno (fijo o móvil, según sea el caso) y la tercera (inferior) la rigidez del material de apoyo, figura 5.7.

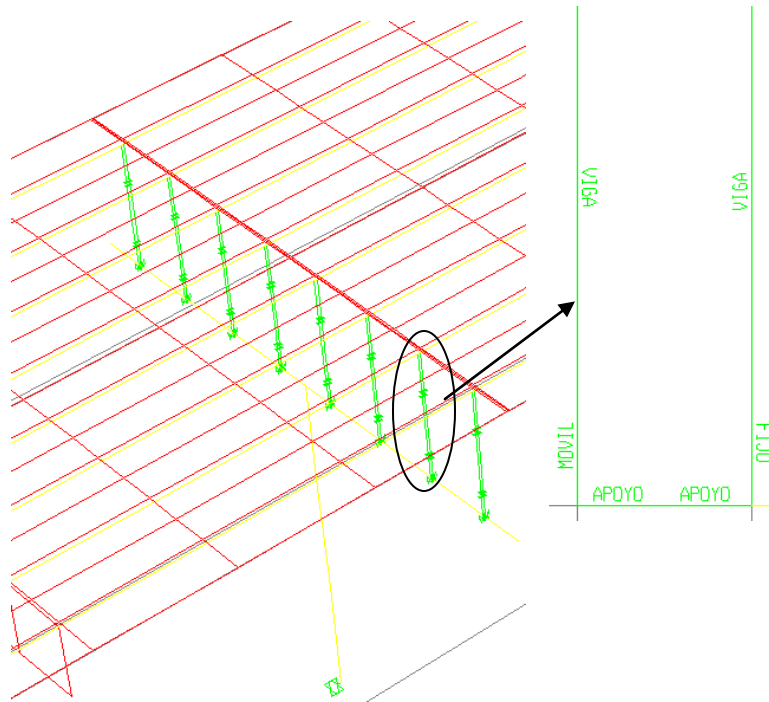


Figura 5.7 Restricciones en los claros del modelo (SAP2000).

5.1.5. Apoyos

Los apoyos pueden definirse con la herramienta “Bearings”, a través de un enlace/apoyo, también pueden definirse estos elementos directamente por el usuario con base en las propiedades del suelo de soporte, lo cual depende de la información con que se cuente. Se permite especificar la rigidez del medio de soporte para cada uno de los seis grados de libertad de la estructura, estos pueden considerarse fijos, total o parcialmente restringidos. En el modelo se asignan las siguientes condiciones, figura 5.8.



Bridge Bearing Name: BBRG1 Units: Tonf, m, C

Bridge Bearing Is Defined By:

☐ Link/Support Property

☒ User Definition

User Bearing Properties

DOF/Direction	Release Type	Stiffness
Translation Vertical (U1)	Fixed	
Translation Normal to Layout Line (U2)	Fixed	
Translation Along Layout Line (U3)	Fixed	
Rotation About Vertical (R1)	Free	
Rotation About Normal to Layout Line (R2)	Free	
Rotation About Layout Line (R3)	Free	

Figura 5.8 Condiciones en los grados de libertad del modelo analítico (SAP2000).

5.1.6. Estribos

La herramienta “Abutments” nos permite especificar las condiciones de apoyo que se tienen en los extremos del puente (estribos), lo cual es función de las propiedades del suelo de soporte y del tipo de cimentación. Se considera que el suelo es flexible cuando se conocen sus condiciones de apoyo, definiéndose la rigidez del suelo para cada uno de los seis grados de libertad, si se desconocen debe ser a criterio del calculista con base en una inspección visual.

La herramienta “Bridge Wizard” asigna tres tipos de “Links” en los apoyos extremos del puente, al igual que los define en los apoyos que se tienen en los apoyos de las pilas intermedias. La única diferencia que existe entre estos modelos son las propiedades del “Link” inferior, el cual se utiliza para representar el suelo donde se apoyará la estructura.



En la figura 5.9 se presentan las propiedades seleccionadas para este ejemplo, soporte fijo en los extremos del puente.

Bridge Abutment Name: BABT1 Units: Tonf, m, C

Girder Support Condition:
☐ Integral
☒ Connect to Girder Bottom Only

Substructure Type:
☒ Foundation Spring
☐ Continuous Beam (Continuously Supported)
 Section Property: +
 Beam Length: +

Foundation Spring:
 Foundation Spring Property: + Fixed

Note: When substructure type is grade beam, foundation spring property represents a line spring.

Figura 5.9 “Abutments”, condiciones de apoyo en los extremos del puente (SAP2000).

5.1.7. Apoyos intermedios

Para determinar las propiedades del cabezal y de las columnas, así como las condiciones de apoyo en la base de las pilas en el modelo analítico, hacemos uso de la herramienta “Bents”. La herramienta nos permite también especificar si el modelo sólo tendrá una línea continua o contará con dos líneas discontinuas, esto se refiere a si la superestructura es continua o simplemente apoyada, lo cual es representativo de las juntas dilatación existentes en la superestructura del puente.

En la figura 5.10 se especifica que la longitud del cabezal será de 11.05 m y que su sección transversal será la definida como sección “CABEZAL”, y que además tendrá una sola columna en toda su longitud. El modelo contará con dos líneas discontinuas de 0.025 m, para contar así con una superestructura simplemente apoyada con una junta de dilatación de 0.05 m.



Bridge Bent Name: BENT1 Units: Tonf, m, C

Bent Data

Cap Beam Length: 11.05

Number of Columns: 1

Cap Beam Section: + CABEZAL

Modify/Show Column Data...

Bent Type

☐ Single Bearing Line (Continuous Superstructure)

☒ Double Bearing Line (Discontinuous Superstructure)

Girder Support Condition Before Bent

☐ Integral

☒ Connect to Girder Bottom Only

Location of Bearing Line Before Bent

Distance from Bent to Bearing Line: 0.025

Girder Support Condition After Bent

☐ Integral

☒ Connect to Girder Bottom Only

Location of Bearing Line After Bent

Distance from Bent to Bearing Line: 0.025

Figura 5.10 Propiedades de la herramienta “Bents” (SAP2000).

Una vez determinado el número de columnas se modifican sus propiedades, seleccionando la ventana y llenando la información que se presenta en la figura 5.11. Las columnas tendrán la sección transversal previamente definida como “COLUMNA”, ubicada a una distancia de 5.525 m a partir del lado izquierdo del cabezal al centro de este, la altura se mide a partir de la parte inferior de la columna hasta el centro de la sección transversal del cabezal (medio peralte), y por último se define que su tipo de apoyo será fijo, figura 5.12.

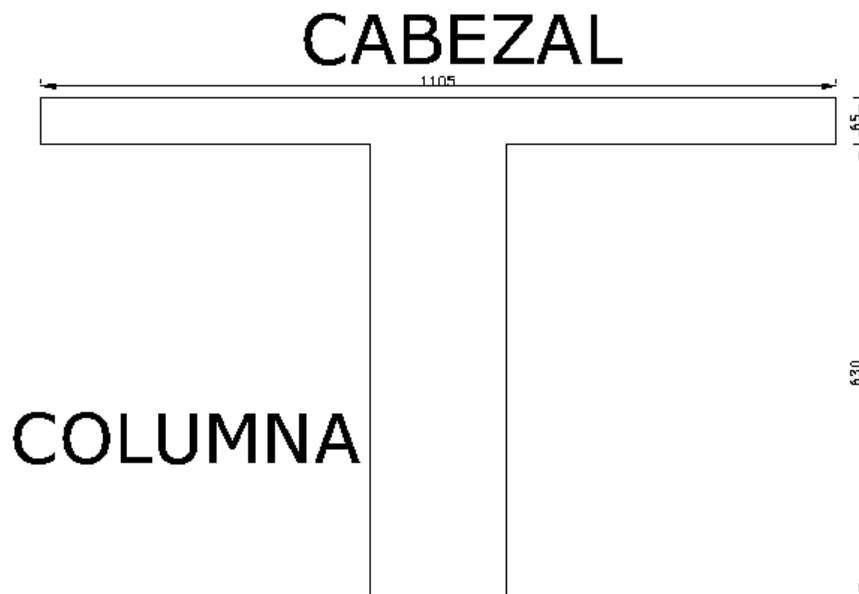


Figura 5.11 Conexión entre el cabezal y la columna.



Column	Section	Distance	Height	Angle	Base Support
1	COLUMNNA	5.525	6.625	0.	Fixed

Notes:

1. The distance is measured from the left end of the cap beam to the center of the column.
2. The column height is measured from the midheight of the cap beam to the bottom of the column.
3. The column angle is measured in degrees counterclockwise from a line parallel to the bent to the column local 2 axis.

Column	R1 Release	R2 Release	R3 Release	R1 Stiffness	R2 Stiffness	R3 Stiffness
1	Fixed	Fixed	Fixed			

Figura 5.12 Propiedades de las columnas (SAP2000).

5.1.8. Objetos del puente

Con la herramienta “Bridge Object”, se define el inicio de la estructura (“Start Abutment”), 0; los dos claro con los que cuenta el puente (“Span1” y “Span2”), con longitudes de 23.05 m y 55.45 m, respectivamente, y por último la longitud total del mismo (“Span To End Abutment”), 78.31 m, figura 5.13.

Span Label	Station m	Span Type
Span1	23.05	Full Span to End Bent
Start Abutment	0.	Start Abutment
Span1	23.05	Full Span to End Bent
Span2	55.45	Full Span to End Bent
Span To End Abutment	78.31	Full Span to End Abutment

Note: 1. Bridge object location is based on bridge section insertion point following specified layout line.

Bridge Object Plan View (X-Y Projection)

North

Y

X

Show Enlarged Sketch...

OK Cancel

Figura 5.13 “Bridge Object” (SAP2000).



Así mismo, con la herramienta “Bridge Object” (“In-Span Cross Diaphragms”) se define la posición y el número de diafragmas existentes en la estructura. La figura 5.14 muestra la forma de asignar los diafragmas a la estructura.

Span	Diaphragm Property	Distance	Bearing
Span1	BDIA1	7.683	Default
Span1	BDIA1	15.366	Default
Span2	BDIA1	10.8	Default
Span2	BDIA1	21.6	Default
Span To End Abutment	BDIA1	7.62	Default
Span To End Abutment	BDIA1	15.24	Default

Figura 5.14 “In-Span Cross Diaphragms”(SAP2000).

En la figura 5.15 se aprecian los elementos con que cuenta el puente Copándaro II y que han sido definidos y modelados con la herramienta “Bridge Object”.



Span Label	Station m	Span Type
Start Abutment	0	Start Abutment
Span1	23.05	Full Span to End Bent
Span2	55.45	Full Span to End Bent
Span To End Abutment	78.31	Full Span to End Abutment

Figura 5.15 Elementos definidos con la herramienta “Bridge Object” (SAP2000).

Si los segmentos antes definidos necesitarán modificar algunas o todas sus propiedades, sólo bastará seleccionar el segmento que se desea cambiar en la parte superior derecha de la ventana que se presentan en la figura anterior y modificar lo que el usuario decida.

5.1.9. Actualización del modelo

Con la herramienta “Update Linked Bridge Model” se creará el modelo analítico del puente, tomando en cuenta todos los elementos que se definieron en los párrafos anteriores, incluyendo los últimos cambios realizados con la opción “Bridge Object”. El tipo de modelo creado a partir de los objetos del puente, puede cambiarse en cualquier momento, si así lo decide el usuario.



En la figura 5.16 se muestra esta opción y los valores utilizados para el modelo del puente Copándaro II, al igual que la actualización del mismo (figura 5.17 y 5.18).

Figura 5.16 Propiedades de la herramienta “Update Linked Bridge Model” (SAP2000).

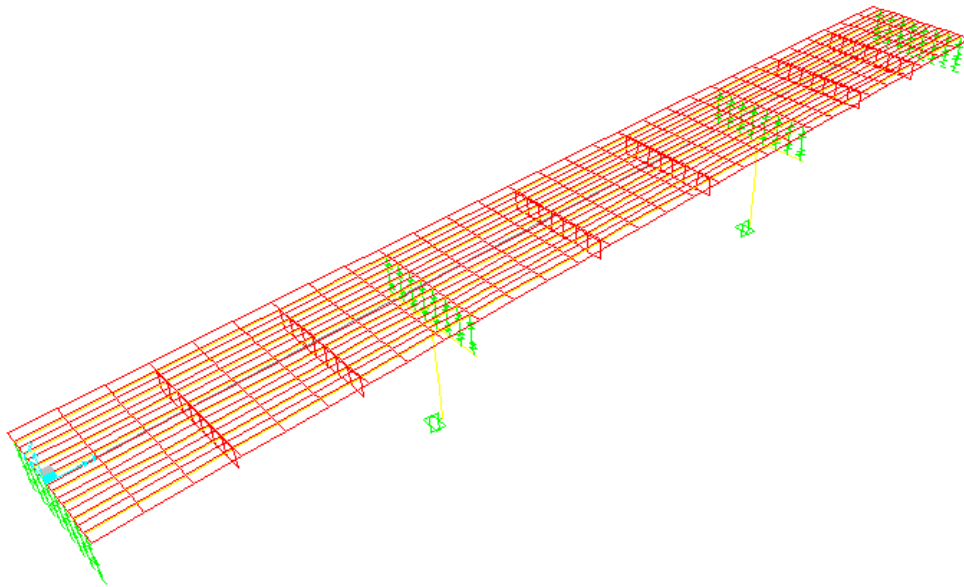


Figura 5.17 Actualización del modelo analítico, 3D (SAP2000).

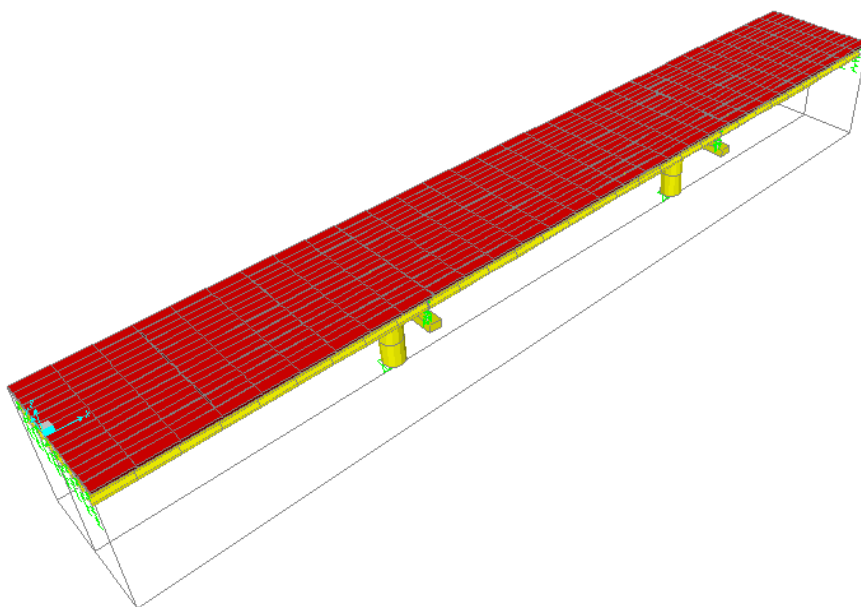


Figura 5.18 Vista extruida del modelo analítico (SAP2000).

5.2. Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muro

Como se realizó en el capítulo 4.2, en este apartado también se realiza el modelo analítico del puente Copándaro II con pilas tipo muro pero con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard”, para ello se define una nueva sección tipo “Shell-Thick” con un espesor de 0.75 m, figura 5.19.



Figura 5.19 Sección muro, elemento tipo “Shell-Thick” (SAP2000).

En el modelo creado en el capítulo anterior (capítulo 5.1), se seleccionan los elementos definidos como “CABEZAL”, así como todos los nodos ubicados en éstos elementos, figura 5.20.

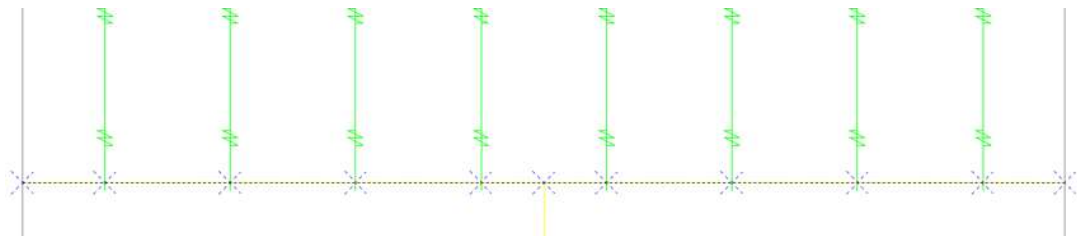


Figura 5.20 Selección de elementos que forman el cabezal, incluyéndose a los nodos (SAP2000).

A continuación se descomponen los elementos antes seleccionados en las intersecciones con los nodos usando los comandos “Edit > Edit Lines > Edit Frames”. Se vuelven a seleccionar todos los elementos que se han dividido con el procedimiento anterior (véase figura 5.20) utilizando “Edit > Extrude > Extrude



Lines to Areas”, tomando en cuenta que para el modelo de los muros se divide su altura en el número de elementos en que se desee discretizarlos, en este caso correspondiente a la longitud de las columnas, donde de acuerdo a su localización con respecto a los ejes globales esta es negativa (-6.63 m). Para este ejemplo dividiremos el muro en dirección longitudinal en 16 elementos, figura 5.21.

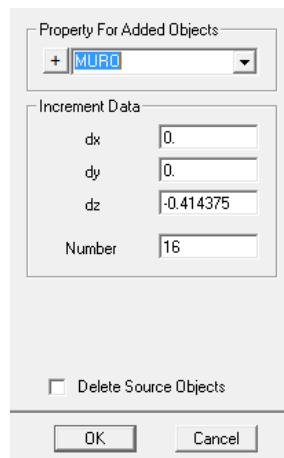


Figura 5.21 Propiedades para modelar las pilas tipo muro (SAP2000).

Se seleccionan los nodos inferiores de las pilas tipo muro y se les asignan las restricciones provistas por la cimentación y el suelo de soporte. En los extremos del puente no se modelan los estribos como muros, más bien se modelan mediante elementos tipo “Links” con rigidez grande que es representativa de este tipo de estructuras y el suelo de soporte. En las figuras 5.22 y 5.23 se presenta el modelo final del puente.

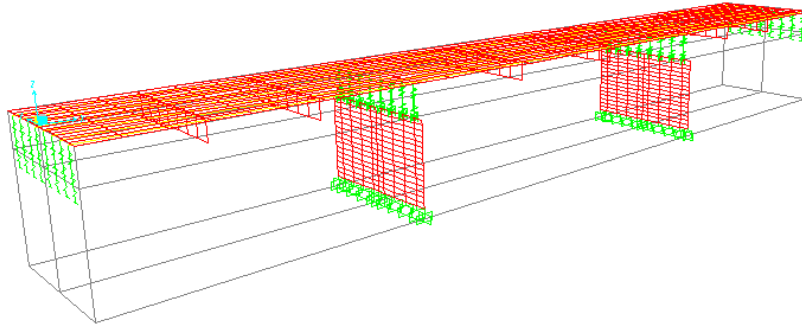


Figura 5.22 Modelo analítico del Puente Copándaro II con pilas tipo muro modelado utilizando la herramienta “Bridge Wizard”, 3D (SAP2000).

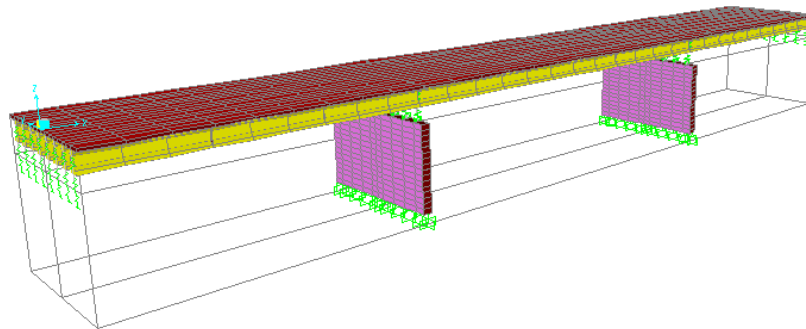


Figura 5.23 Modelo analítico del Puente Copándaro II con pilas tipo muro modelado utilizando la herramienta “Bridge Wizard”, “Extrude View” (SAP2000).

5.3. Puente continuo sobre apoyos de neopreno

Con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” es muy sencillo modelar el puente Copándaro II como puente continuo, el procedimiento que se sigue para generar el modelo analítico es el mismo que se describió en el capítulo 5.1, el único cambio del modelado es la definición de la continuidad de la superestructura, para esto solamente es necesario definir la continuidad con ayuda de la herramienta “Bents”, como se muestra en la figura 5.24.



Para las conexiones entre la superestructura y la subestructura del puente se toman en cuenta las mismas consideraciones realizadas en el capítulo 4.3.

Figura 5.24 Definición de la continuidad de la superestructura (SAP2000).

Capítulo VI

6. Comparación de modelos estructurales

Para comparar las respuestas estructurales dinámicas obtenidas en los modelos estructurales creados en el programa SAP2000 en la forma tradicional y por medio de la herramienta “Bridge Wizard”, se utilizan gráficas y tablas. Para realizar estas comparaciones se seleccionan elementos estructurales que correspondan al mismo caso en ambos modelos, esto es, elegir la misma columna y el mismo apoyo de neopreno para que la comparación sea válida. Las respuestas que se seleccionaron para hacer esta comparativa son los desplazamientos, fuerzas cortantes, momentos flexionantes y propiedades dinámicas, para las dos direcciones ortogonales en planta del puente en estudio.



Las gráficas que presentan la respuesta estructural de puentes con subestructura tipo muros, donde los muros se modelaron con elementos finitos, muestran la variación en el tiempo de la fuerza máxima, el momento máximo y el cortante máximo. Para los apoyos de neopreno se toman en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente. Para obtener las gráficas es necesario identificar a los elementos (columnas y apoyos) y a sus nodos; el programa designa con un único número ("label"), designado por default, a cada elemento y a cada nodo que conforman la estructura, para saber su número identificador solamente se tiene que dar un "clic" derecho sobre el elemento o sobre el nodo que se desee conocer su número identificador.

Para obtener los elementos mecánicos de interés, es muy importante localizar los ejes locales ("Local Axes") de los elementos que forman los modelos analíticos, ya que esto nos indica la dirección en que se presentan los esfuerzos. Con ayuda de la herramienta "Set display Options" utilizada en el capítulo 4.1, podemos observar la ubicación de los ejes locales en los elementos estructurales que se deseen, en este caso de las columnas (elementos tipo "Frame") y de los apoyos de neopreno (elementos tipo "Links"), figura 6.1.

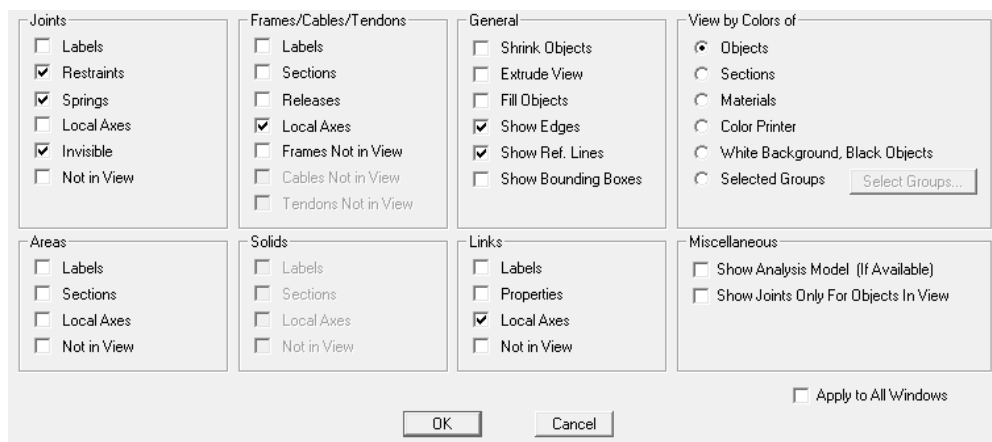


Figura 6.1 Ejes locales de las columnas y de los apoyos de neopreno.



Cabe mencionar que, por la forma de proceder del software, los modelos analíticos que se realizaron de forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” presentan una ubicación diferente de los ejes locales, como se muestra en las figuras 6.2 y 6.3.

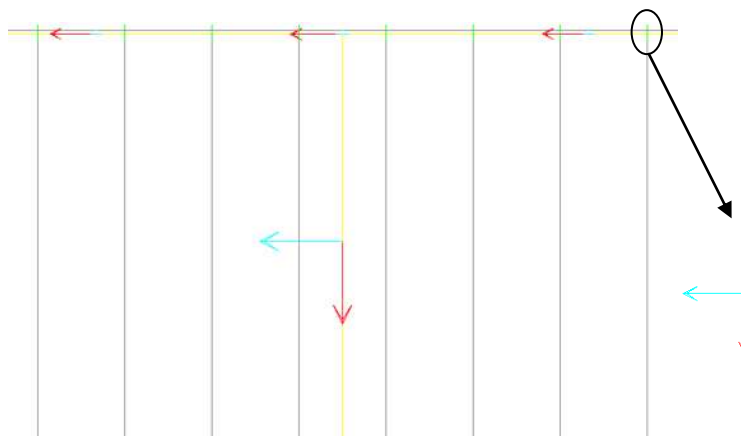


Figura 6.2 Ubicación de los ejes locales en los modelos realizados de la forma tradicional (SAP2000).

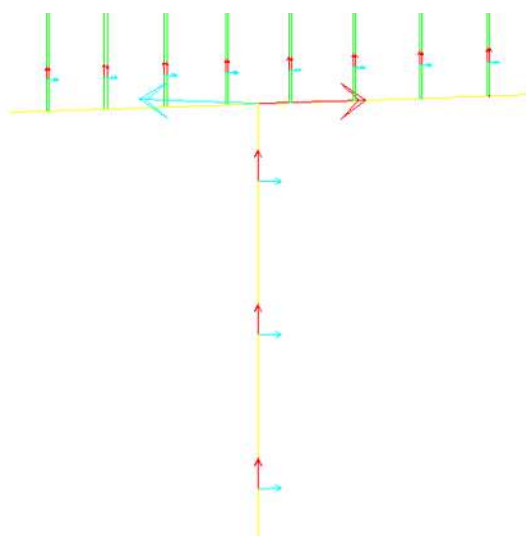


Figura 6.3 Ubicación de los ejes locales en los modelos realizados con la herramienta “Bridge Wizard” (SAP2000).



Se puede observar en las figuras 6.2 y 6.3 que, la ubicación de los ejes locales en las columnas y en los apoyos de neopreno es la misma. El color rojo en los ejes representa el eje vertical z (1); el blanco el eje transversal y (2) y el azul el eje longitudinal x (3).

El programa presenta los resultados del análisis estructural en forma gráfica, donde el eje longitudinal corresponde al tiempo y el vertical a la respuesta de interés, en la ventana que despliega el programa se indica también, las respuestas máximas y mínimas, así como el tiempo en el que se presentan. Para obtener las gráficas utilizamos la herramienta “Display” (“Show Plot Functions-Define Plot Functions”), para el tipo de carga “MANZANILLO X”, previamente definida en los análisis de carga a realizar, figura 6.4.

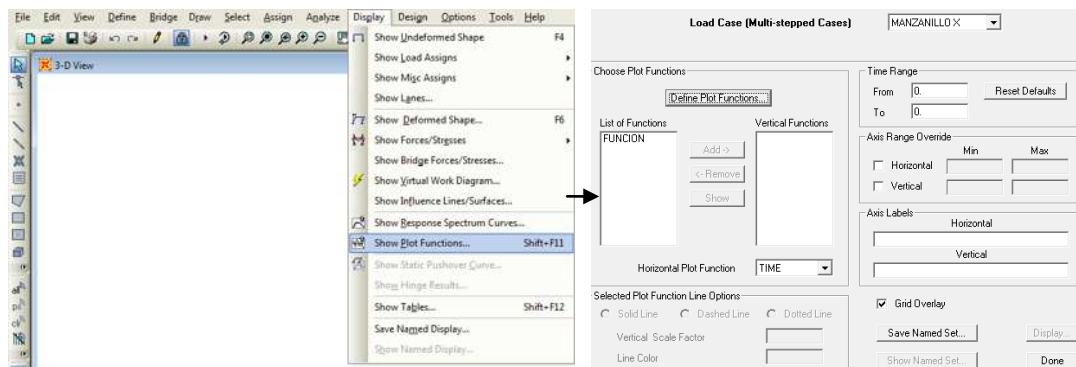


Figura 6.4 Herramienta “Display”, “Show Plot Functions”(SAP2000).

6.1. Extracción de resultados de los modelos analíticos

Para ver y analizar los resultados obtenidos por la ejecución del programa SAP2000 para un modelo analítico de interés, se selecciona la herramienta “Display”, de donde se desprende una lista de opciones de resultados, los cuales se activan como función del modelo estructural que se haya desarrollado, es decir, unas herramientas corresponden a elementos tipo barra, otras a elementos finitos, otras para desplazamientos, y otras para



mostrar la respuesta en el dominio del tiempo. Para dar una idea general se describe a continuación como se extraen los resultados cuando se conduce un análisis dinámico de integración paso a paso.

Para obtener la variación de la carga axial respecto al tiempo de los elementos tipo “Frame”, que en este caso corresponden a las columnas y muros, se utilizan las funciones tipo “Frame Forces”. Para el caso que vamos a describir se seleccionan los elementos definidos con el número 86 y 1396 para los modelos creados de la forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard”, respectivamente.

Los elementos mecánicos evaluados en el programa se definen a lo largo del elemento, por lo que se pueden definir mediante sus distancias relativas o absolutas. El punto de referencia que toma el programa para definir las distancias es el nodo inicial del elemento (“START JOINT” (I)), por lo que la distancia relativa en este punto es cero, mientras que para el nodo final (“END JOINT” (J)), corresponde a la unidad. En la figura 6.5 se ilustra la forma de proceder para definir la carga axial.

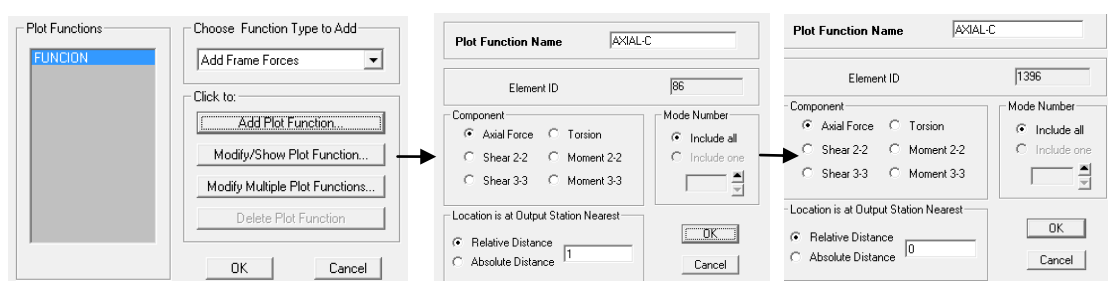


Figura 6.5 Carga axial (SAP2000).

Los desplazamientos de los nodos superior de las columnas o muros (elementos tipo “Frame”) en sentido longitudinal (x) y transversal (y), se obtienen seleccionando el número identificador de su nodo, 119i en los modelos



realizados de forma tradicional y 1334j con la herramienta “Bridge Wizard”. Para conocer los desplazamientos en los nodos se utilizan las funciones tipo “Joint Disps/Forces”. La figura 6.6 presenta la forma de proceder para los dos tipos de desplazamientos y en las dos formas de realizar los modelos.

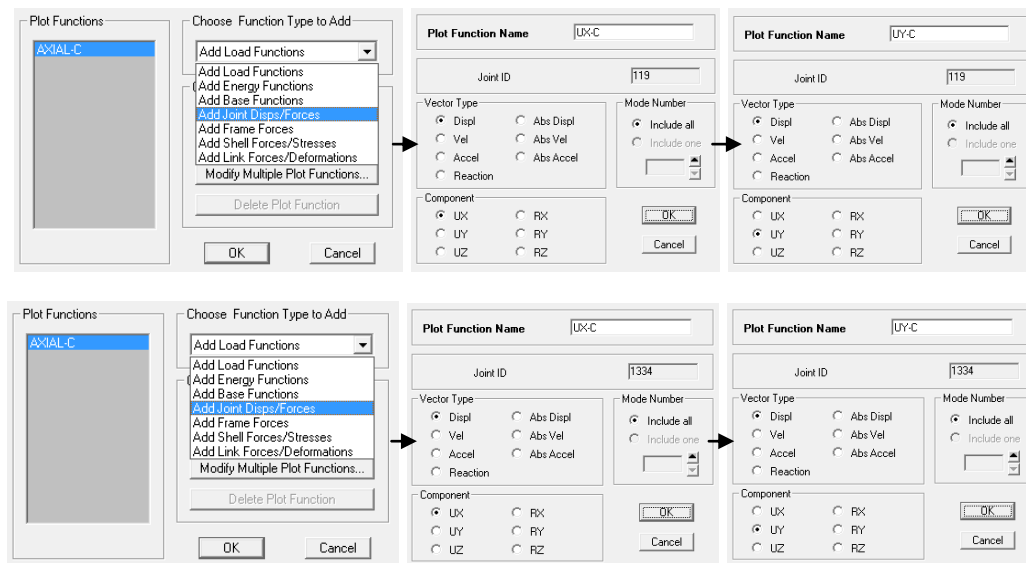


Figura 6.6 Desplazamientos en sentido longitudinal y transversal en los nodos (SAP2000).

Las fuerzas cortantes y momentos en las columnas o muros, se determinan con funciones tipo “Frame Forces”, en sentido longitudinal (2) y transversal (3), esto según la orientación de los ejes locales en los modelos realizados de la forma tradicional (figura 6.2). Para los modelos realizados mediante el “Bridge Wizard” el sentido longitudinal (3) y transversal (2) cuentan con otro tipo de orientación según sus ejes locales, figura 6.3. Las figuras 6.7 y 6.8 muestran las fuerzas y los momentos.

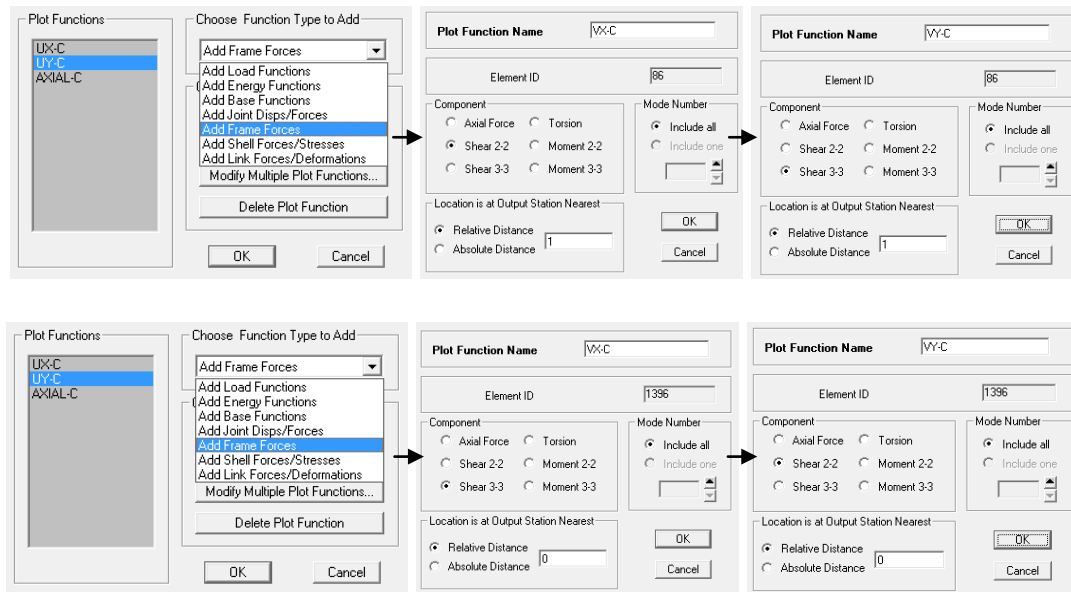


Figura 6.7 Fuerzas cortantes en sentido longitudinal y transversal (SAP2000).

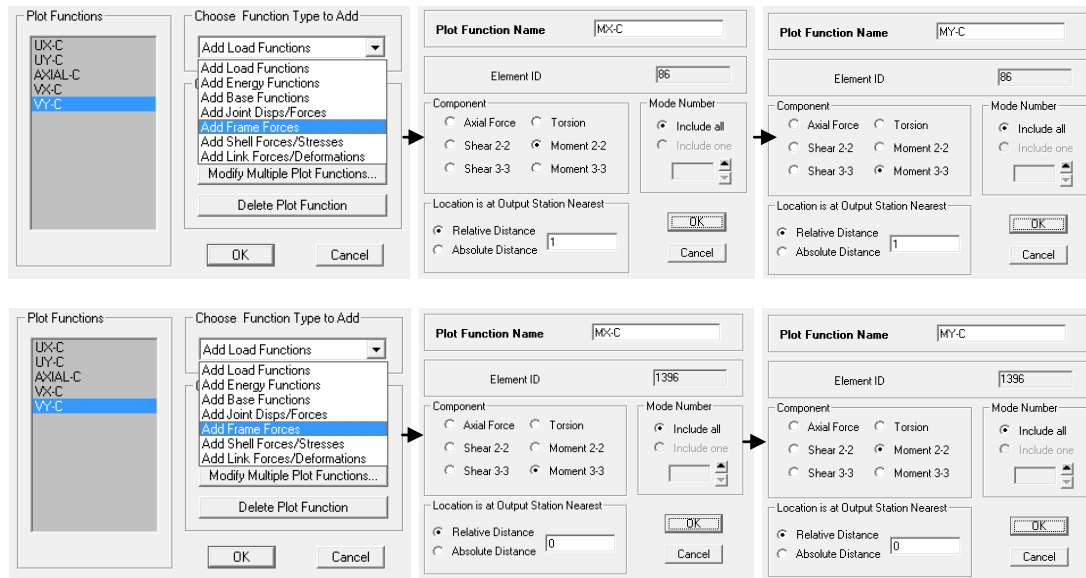


Figura 6.8 Momentos alrededor de los ejes longitudinal y transversal (SAP2000).

El apoyo de neopreno (“Link”) del cual se obtendrán los desplazamientos y los cortantes en sentido longitudinal (2) y transversal (3), corresponde al



elemento definido como número 15 con nodos 10i localizado en la parte superior y 152j en la parte inferior para los modelos tradicionales. Mientras que para los modelos realizados con el “Bridge Wizard” el apoyo se presenta como el elemento 650 con nodos 1556i en la parte inferior y 1557j en la superior, así mismo, el sentido longitudinal (3) y transversal (2) se invierten según los ejes locales.

Los cortantes se pueden obtener en cualquiera de los dos nodos, sin embargo, por cuestiones prácticas sólo se obtendrán en el nodo inferior. La función “Link Forces/Deformations” permite obtener los desplazamientos y los cortantes en los apoyos de neopreno, figura 6.9 y 6.10 respectivamente.

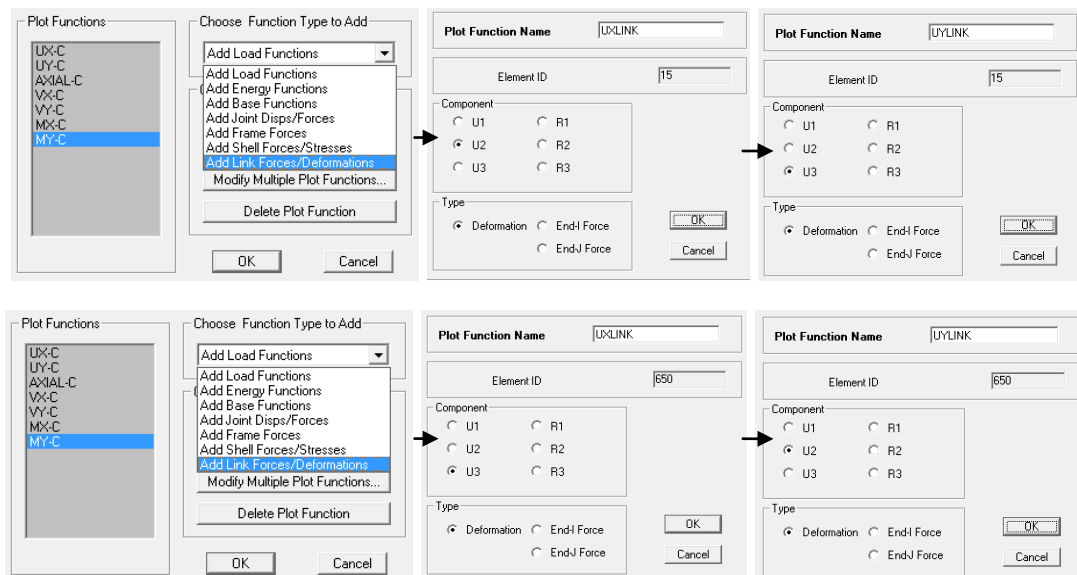


Figura 6.9 Desplazamientos en sentido longitudinal y transversal en los apoyos de neopreno (SAP2000).

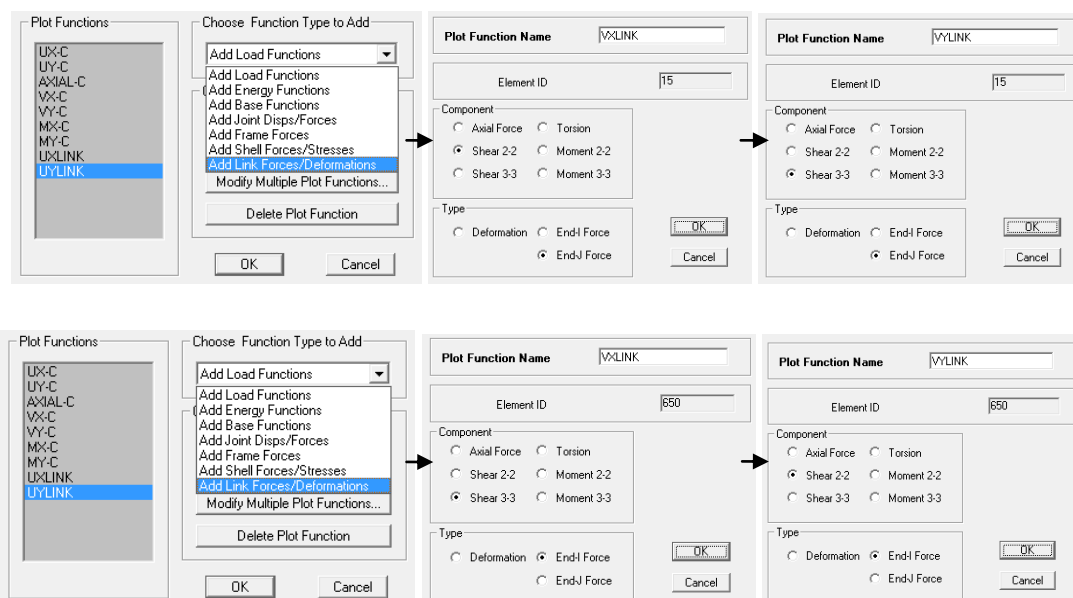


Figura 6.10 Fuerzas cortantes en sentido longitudinal y transversal en los apoyos de neopreno (SAP2000).

Una vez definidos todos los elementos mecánicos en los modelos realizados de la forma tradicional y con la ayuda de la herramienta “Bridge Wizard”, se procede a obtener las gráficas correspondientes.

Para obtener todas las gráficas es necesario agregar todas las funciones de “List of Functions” a “Vertical Functions” por medio de la opción “Add” con el tiempo como función horizontal en dichas gráficas, “Horizontal Plot Function” para finalmente con ayuda de la opción “Display” desplegar las funciones. Para guardar las funciones como tablas en archivos “txt”, utilizamos la opción “File>Print Tables to File”. En la figura 6.11 se presenta la forma de proceder para obtener y guardar las gráficas.

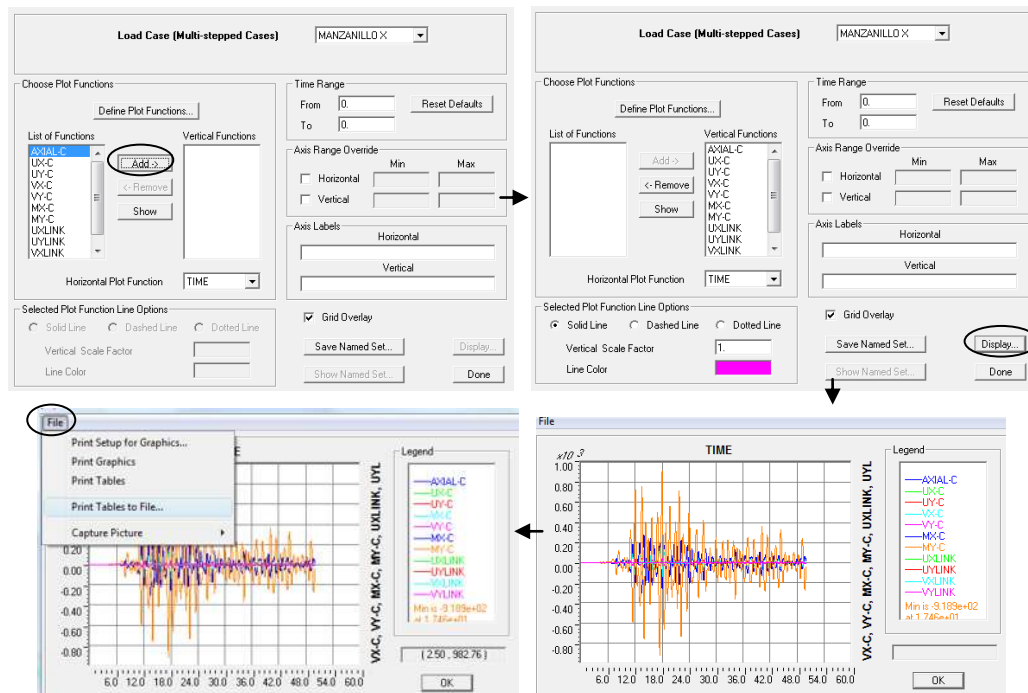


Figura 6.11 Gráficas de los elementos mecánicos respecto al tiempo (SAP2000).

Es importante mencionar que en el caso de los modelos realizados de la forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” en los que se modelaron las pilas tipo muro como elementos finitos no se presentan los desplazamientos, las fuerzas cortantes y los momentos, en sentido longitudinal y transversal. Debido a que los muros se modelan con elementos finitos, sólo se obtienen las fuerzas máximas, los momentos máximos y los cortantes máximos.

Para esto se analiza el elemento finito 479 para el nodo 1844 en el modelo realizado de la forma tradicional, ubicado en la parte inferior del elemento. Para el modelo realizado con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” se analiza el elemento 1498 nodo 2275. Debido a que los elementos finitos se modelaron como elementos tipo “Shell”, es este tipo de función la que permite dicho análisis.



Para comparar las respuestas estructurales es necesario que los elementos finitos así como sus nodos que se comparan, tengan la misma ubicación en los muros de los modelos. Las figuras 6.12 a 6.14 se muestra como se seleccionan las fuerzas, los momentos y los cortantes máximos que se generan en los elementos finitos para una condición de carga particular.

Plot Function Name FMAX

Element ID 479

Type
☒ Resultants
☐ Stresses Top
☐ Stresses Bottom

Mode Number
☒ Include all
☐ Include one

Component
☐ F11 ☐ M11 ☐ V13
☐ F22 ☐ M22 ☐ V23
☐ F12 ☐ M12 ☐ VMAX
☒ FMAX ☐ MMAX
☐ FMIN ☐ MMIN
☐ FVM

Specify Output Location
Output Location Reference Point
☐ Reference To Selected Coordinate System Origin
☒ Reference To Selected Joint 1844

Coordinate System For Offsets From Reference Location
Coordinate System Local

Offsets From Reference Point To Output Location
Offset 1 0.
Offset 2 0.
Offset 3 0.

☐ Move Output Location To Closest Joint

OK Cancel

Plot Function Name FMAX

Element ID 1498

Type
☒ Resultants
☐ Stresses Top
☐ Stresses Bottom

Mode Number
☒ Include all
☐ Include one

Component
☐ F11 ☐ M11 ☐ V13
☐ F22 ☐ M22 ☐ V23
☐ F12 ☐ M12 ☐ VMAX
☒ FMAX ☐ MMAX
☐ FMIN ☐ MMIN
☐ FVM

Specify Output Location
Output Location Reference Point
☐ Reference To Selected Coordinate System Origin
☒ Reference To Selected Joint 2275

Coordinate System For Offsets From Reference Location
Coordinate System GLOBAL

Offsets From Reference Point To Output Location
Offset Global X 0.
Offset Global Y 0.
Offset Global Z 0.

☐ Move Output Location To Closest Joint

OK Cancel

Figura 6.12 Fuerzas máximas en los muros modelados con elementos finitos (SAP2000).



Plot Function Name MMAX

Element ID 479

Type
☒ Resultants
☐ Stresses Top
☐ Stresses Bottom

Mode Number
☒ Include all
☐ Include one

Component
☐ F11 ☐ M11 ☐ V13
☐ F22 ☐ M22 ☐ V23
☐ F12 ☐ M12 ☐ VMAX
☐ FMAX ☒ MMAX
☐ FMIN ☐ MMIN
☐ FVM

Specify Output Location
Output Location Reference Point
☐ Reference To Selected Coordinate System Origin
☒ Reference To Selected Joint 1844

Coordinate System For Offsets From Reference Location
 Coordinate System Local

Offsets From Reference Point To Output Location
 Offset 1 0.
 Offset 2 0.
 Offset 3 0.
☐ Move Output Location To Closest Joint

OK Cancel

Plot Function Name MMAX

Element ID 1498

Type
☒ Resultants
☐ Stresses Top
☐ Stresses Bottom

Mode Number
☒ Include all
☐ Include one

Component
☐ F11 ☐ M11 ☐ V13
☐ F22 ☐ M22 ☐ V23
☐ F12 ☐ M12 ☐ VMAX
☐ FMAX ☒ MMAX
☐ FMIN ☐ MMIN
☐ FVM

Specify Output Location
Output Location Reference Point
☐ Reference To Selected Coordinate System Origin
☒ Reference To Selected Joint 2275

Coordinate System For Offsets From Reference Location
 Coordinate System GLOBAL

Offsets From Reference Point To Output Location
 Offset Global X 0.
 Offset Global Y 0.
 Offset Global Z 0.
☐ Move Output Location To Closest Joint

OK Cancel

Figura 6.13 Momentos máximos en los muros modelados con elementos finitos (SAP2000).



The figure displays two screenshots of the SAP2000 software interface, specifically the 'Specify Output Location' dialog box. Both screenshots show the 'Plot Function Name' set to 'VMAX' and the 'Element ID' set to 479 (top) and 1498 (bottom). The 'Type' is set to 'Resultants' and the 'Mode Number' is set to 'Include all'. The 'Coordinate System' is set to 'Local' (top) and 'GLOBAL' (bottom). The 'Offset' values are set to 0.0 for all three offsets. The 'Move Output Location To Closest Joint' checkbox is unchecked in both screenshots.

Figura 6.14 Cortantes máximos en los muros modelados con elementos finitos (SAP2000).

6.2. Ventajas y desventajas en la creación de los modelos

6.2.1. Ventajas en la creación de los modelos de la forma tradicional

Una de las ventajas más importantes de esta forma de proceder es el orden, ya que, el modelo de la estructura se puede empezar realizando el modelado de los elementos que el usuario considere pertinentes, es decir, no importa el orden que se decida tomar para el modelado de la estructura.



Para la creación de los modelos, el usuario puede auxiliarse de la creación de mallas que permitan modelar todas y cada una de las características que presenta el puente, agregando las mallas que sean necesarias para ello en cualquier momento.

El modelado de los elementos estructurales con sección variable es muy simple, ya que sólo basta definir cada una de las secciones que hacen que el elemento sea variable con las longitudes correspondientes, para tener así una sección variable.

Cada uno de los elementos modelados de la estructura cuenta con las propiedades geométricas y mecánicas que se han decidido asignar.

6.2.2. Desventajas en la creación de los modelos de la forma tradicional

Una gran desventaja de este tipo de modelos es el tiempo que se requiere para el modelado de los puentes; ya que se define y modela independientemente cada uno de los elementos estructurales.

Tal vez una de las desventajas más importantes es el modelado de los puentes simplemente apoyados, ya que, se debe realizar el modelado de las juntas de dilatación en la superestructura del puente, debido a que no se cuenta con algún tipo de opción para realizarlo en forma automática.



En el caso del modelado de la losa, es necesario ubicarla a la altura correspondiente, ya que el programa la posiciona en el centroide de las vigas que constituyen la superestructura del puente.

6.2.3. Ventajas en la creación de los modelos con la herramienta “Bridge Wizard”

Una gran ventaja que posee la herramienta “Bridge Wizard” es la rapidez con que se pueden modelar los puentes, esto debido a que no modela uno a uno cada elemento de la estructura, sino que ya tiene un procedimiento a seguir donde se van definiendo los elementos que forman la superestructura, y por otro la subestructura.

La herramienta modela por default las juntas de dilatación en el caso del modelo de los puentes simplemente apoyados, ya que sólo es necesario especificar la continuidad de la superestructura del puente.

6.2.4. Desventajas en la creación de los modelos con la herramienta “Bridge Wizard”

Una gran desventaja para realizar modelos con esta herramienta es que se debe de seguir un orden (capítulo 5.1) para poder definir algunos de los elementos de la estructura.



La herramienta designa por default todas las propiedades de los apoyos de neopreno (“Links”), por lo que estas deben de ser modificadas si las propiedades son conocidas.

Se complica el modelado de los elementos estructurales con sección variable.

6.3. Propiedades dinámicas de los puentes

Los parámetros dinámicos más importantes de un puente son, su periodo de vibrar y su amortiguamiento, por lo que es necesario conocer estas propiedades en la estructura ya construida y durante su operación pues de ellas depende básicamente su respuesta dinámica. Cualquier cambio o degradación de estos parámetros significa un cambio en su comportamiento estructural debido al deterioro de los materiales durante el paso del tiempo o algún daño debido a la ocurrencia de algún evento accidental extraordinario, como pueden ser un sismo o incluso el tránsito de una avenida máxima que produzca socavación en la cimentación.

Los periodos de vibrar de los modelos de los puentes simplemente apoyados con pilas tipo columnas, considerando 12 modos de vibrar en el análisis modal, presentan una variación de 0.34555 a 1.19336 segundos, mientras que los periodos de los puentes simplemente apoyados en pilas tipo muro oscilan entre 0.259 y 1.09585 segundos, los modelos de los puentes continuos presentan periodos más pequeños, entre 0.15063 y 1.07491 segundos. Los resultados que se obtienen en los modelos realizados de la forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” son muy parecidos. Lo anterior se registra en las tablas 4 a 6.

**Tabla 4 Periodos y modos de vibrar de los puentes con columnas.**

Modo	Puentes simplemente apoyados con pilas tipo columnas			
	Forma tradicional		Bridge Wizard	
	Dirección	T(seg)	Dirección	T(seg)
1	Transversal	1.01437	Transversal	1.19336
2	Longitudinal	0.97260	Longitudinal	1.00158
3	Transversal	0.80821	Transversal	0.90994
4	Transversal	0.80230	Transversal	0.84022
5	Longitudinal	0.78821	Longitudinal	0.79334
6	Longitudinal	0.76469	Longitudinal	0.77046
7	Cabeceo	0.67598	Transversal	0.63960
8	Transversal	0.61853	Cabeceo	0.58862
9	Flexión	0.59398	Flexión	0.52950
10	Transversal	0.52859	Transversal	0.49802
11	Transversal	0.50007	Transversal	0.48370
12	Cabeceo	0.42941	Cabeceo	0.34555

**Tabla 5 Periodos y modos de vibrar de los puentes con muros.**

Modo	Puentes simplemente apoyados con pilas tipo muro					
	Forma tradicional (elemento "Frame")		Forma tradicional (elemento finito)		Bridge Wizard	
	Dirección	T(seg)	Dirección	T(seg)	Dirección	T(seg)
1	Longitudinal	1.07981	Longitudinal	1.09585	Longitudinal	1.01134
2	Transversal	0.97582	Transversal	1.04814	Transversal	0.96243
3	Longitudinal	0.81356	Transversal	0.82053	Transversal	0.81144
4	Transversal	0.79328	Longitudinal	0.81702	Transversal	0.80768
5	Transversal	0.77910	Transversal	0.81660	Longitudinal	0.79590
6	Longitudinal	0.77233	Longitudinal	0.77277	Longitudinal	0.77084
7	Cabeceo	0.63196	Cabeceo	0.68276	Transversal	0.55759
8	Flexión	0.59382	Transversal	0.62954	Flexión	0.48590
9	Transversal	0.58780	Flexión	0.59368	Transversal	0.48357
10	Transversal	0.51818	Transversal	0.53976	Transversal	0.48354
11	Transversal	0.49641	Transversal	0.50492	Cabeceo	0.44246
12	Cabeceo	0.39849	Cabeceo	0.43870	Flexión	0.25900

**Tabla 6 Periodos y modos de vibrar de los puentes continuos.**

Modo	Puentes continuos			
	Forma tradicional		Bridge Wizard	
	Dirección	T(seg)	Dirección	T(seg)
1	Transversal	0.98702	Transversal	1.07491
2	Longitudinal	0.96737	Longitudinal	0.98312
3	Transversal	0.73731	Transversal	0.76884
4	Cabeceo	0.59000	Cabeceo	0.51682
5	Flexión	0.43356	Flexión	0.38953
6	Cabeceo	0.39157	Cabeceo	0.34431
7	Cabeceo	0.32421	Cabeceo	0.27907
8	Flexión	0.29899	Flexión	0.27062
9	Flexión	0.29278	Flexión	0.26341
10	Transversal	0.21310	Transversal	0.21398
11	Cabeceo	0.19058	Cabeceo	0.15776
12	Flexión	0.17819	Flexión	0.15063

La respuesta estructural de un puente se puede determinar por medio de acelerómetros ubicados sobre él, estos acelerómetros pueden registrar excitaciones del tipo ambiental, armónica (vibración forzada) y acelerogramas reales. La excitación ambiental es aleatoria y es ocasionada por el tránsito de vehículos y personas, por lo general presentan amplitudes muy bajas. Por otra parte, la excitación armónica no es provocada por la naturaleza sino por medios externos que pueden controlar la amplitud y la frecuencia de excitación. Con estudios de este tipo se pueden calibrar los modelos analíticos de cualquier tipo de estructura para verificar su validez mediante la comparación de los resultados obtenidos con un análisis modal.



6.4. Elementos mecánicos en las barras

Una vez obtenidas las gráficas (capítulo 6.1), se procede a evaluar la aproximación de las respuestas estructurales de los modelos analíticos realizados de la forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard”. Para lo anterior, se evalúan los desplazamientos, cortantes y los momentos en las pilas tipo columnas o tipo muro, mientras que en los apoyos de neopreno (“Links”) sólo se obtienen los desplazamientos y los cortantes.

6.4.1 Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas con columnas

En las tablas 7 y 8 se muestran los máximos elementos mecánicos en sentido longitudinal que presentan las columnas y apoyos, respectivamente, de los modelos analíticos.

Tabla 7 Respuesta estructural de las columnas.

Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo columnas						
Modelo	Columnas					
	Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)		Momento alrededor del eje longitudinal (Ton-m)	
	Máximo	Tiempo (seg)	Máximo	Tiempo (seg)	Máximo	Tiempo (seg)
Bridge Wizard	0.0107	18.0000	147.2817	18.0000	470.8842	13.5600
Forma tradicional	0.0078	17.4600	145.8535	17.4600	305.2252	13.4600

**Tabla 8 Respuesta estructural de los apoyos de neopreno.**

Puente simplemente apoyado sobre apoyos de neopreno y pilas tipo columnas				
Modelo	Apoyos de neopreno			
	Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)	
	Máximo	Tiempo (seg)	Máximo	Tiempo (seg)
Bridge Wizard	0.0450	15.3000	9.0087	15.3000
Forma tradicional	0.0501	15.2800	10.0179	15.2800

En las figuras 6.15 a 6.20 se presentan las respuestas estructurales en el tiempo de las columnas, así como las diferencias que existen entre los modelos realizados de la forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” (FT/BW).

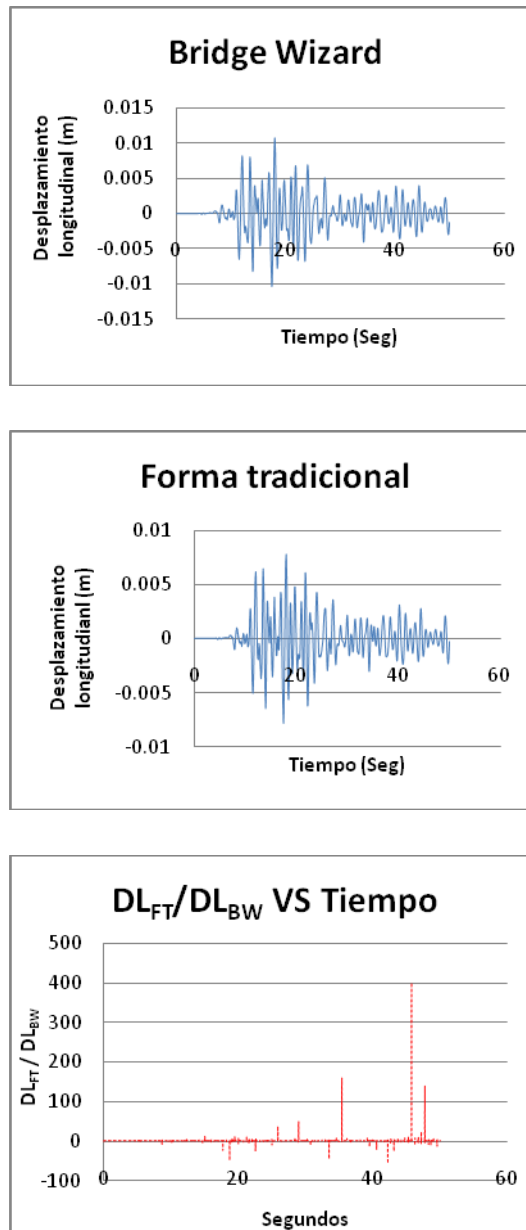


Figura 6.15 Desplazamientos longitudinales en el tiempo de las columnas.

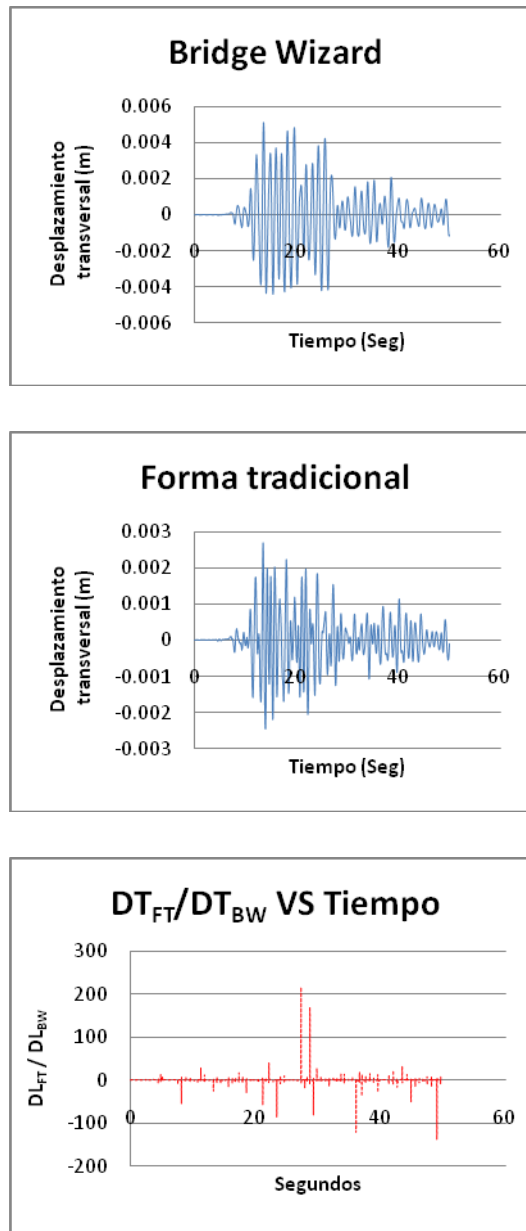


Figura 6.16 Desplazamientos transversales en el tiempo de las columnas.

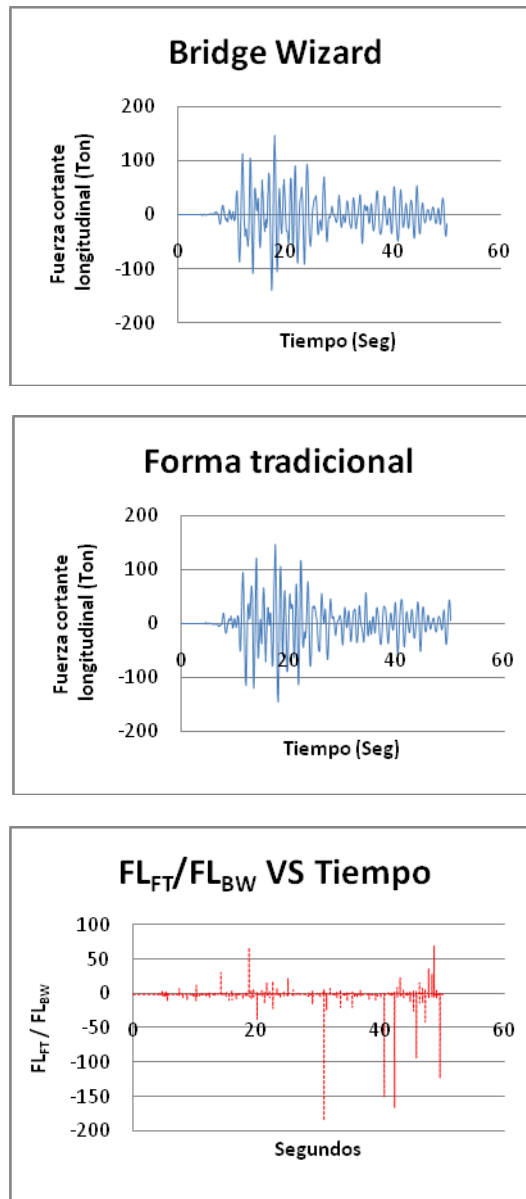


Figura 6.17 Fuerzas cortantes longitudinales en el tiempo de las columnas.

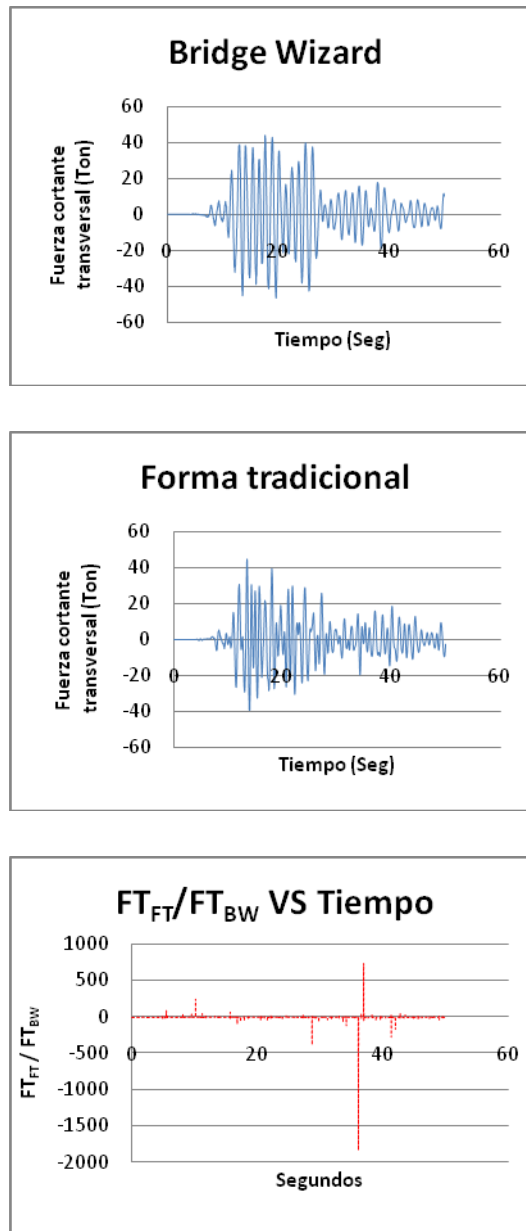


Figura 6.18 Fuerzas cortantes transversales en el tiempo de las columnas.

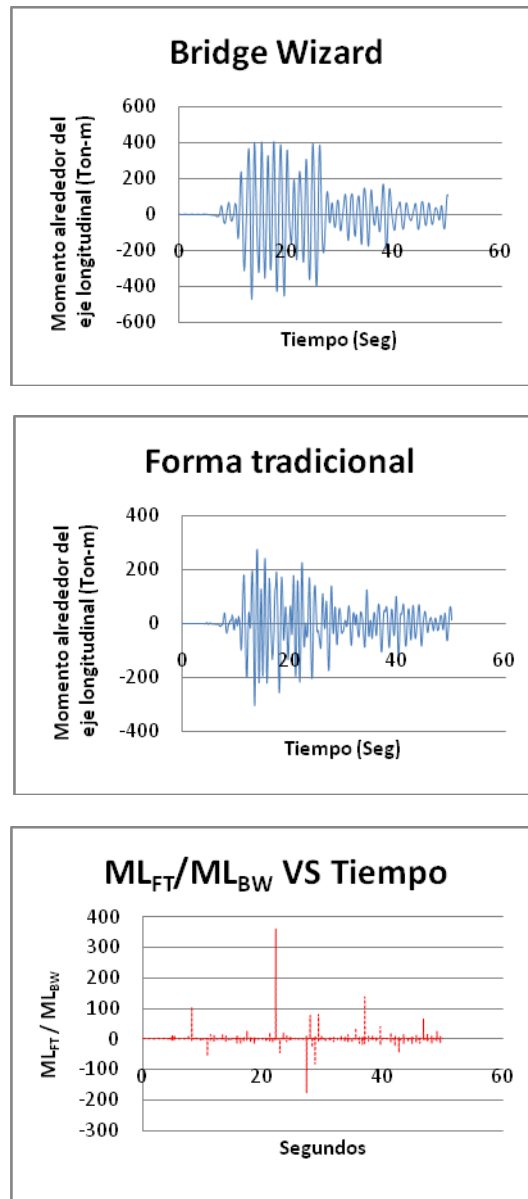


Figura 6.19 Momentos alrededor del eje longitudinal en el tiempo de las columnas.

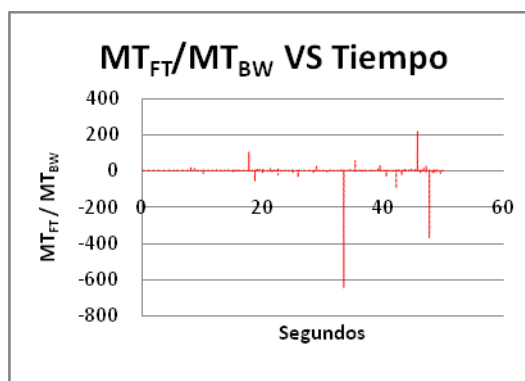
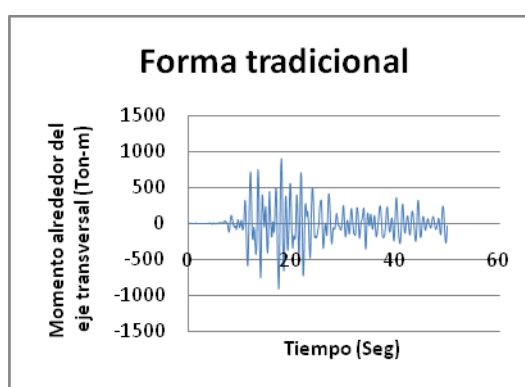
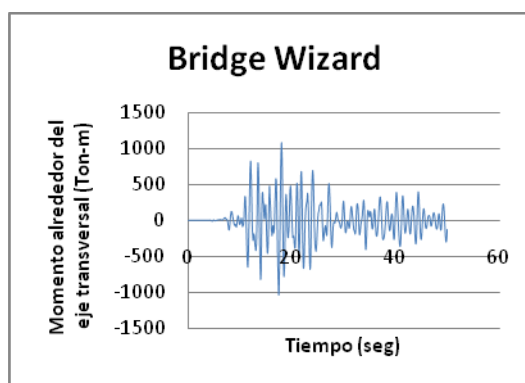


Figura 6.20 Momentos alrededor del eje transversal en el tiempo de las columnas.

En las figuras 6.21 a 6.24 se presenta el comportamiento estructural en el tiempo de los apoyos de neopreno, así como las relaciones correspondientes que se presentan entre los modelos realizados de la forma tradicional y con la herramienta “Bridge Wizard” (FT/BW).

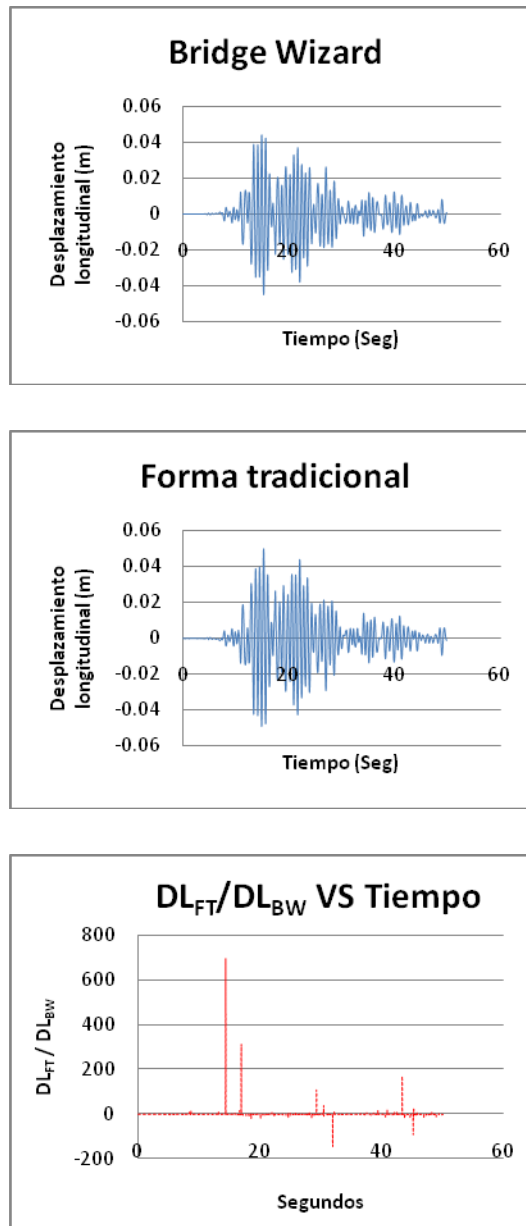


Figura 6.21 Desplazamientos longitudinales en el tiempo de los apoyos de neopreno.

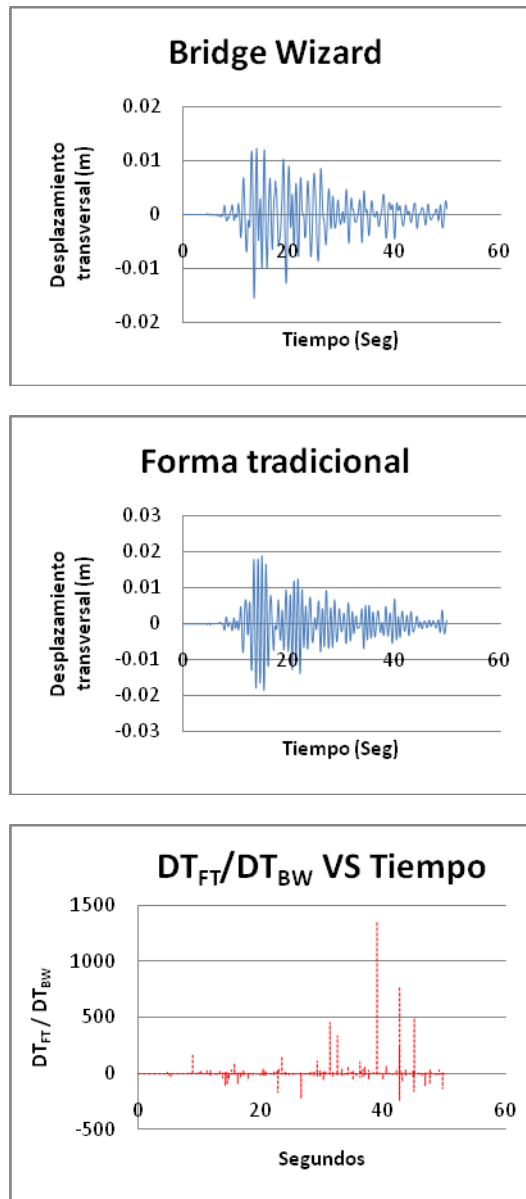


Figura 6.22 Desplazamientos transversales en el tiempo de los apoyos de neopreno.

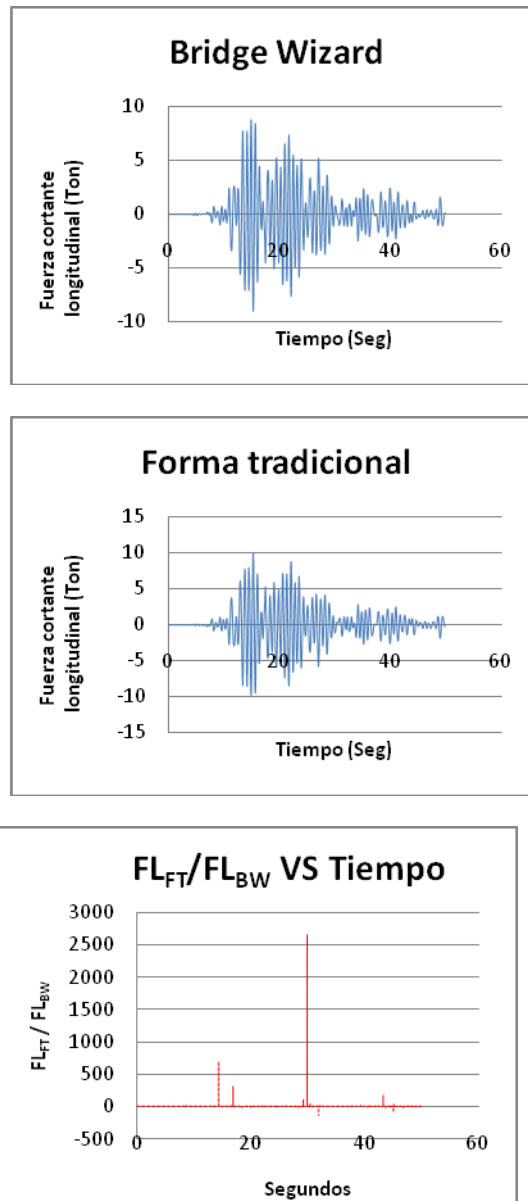


Figura 6.23 Fuerzas cortantes longitudinales en los apoyos de neopreno.

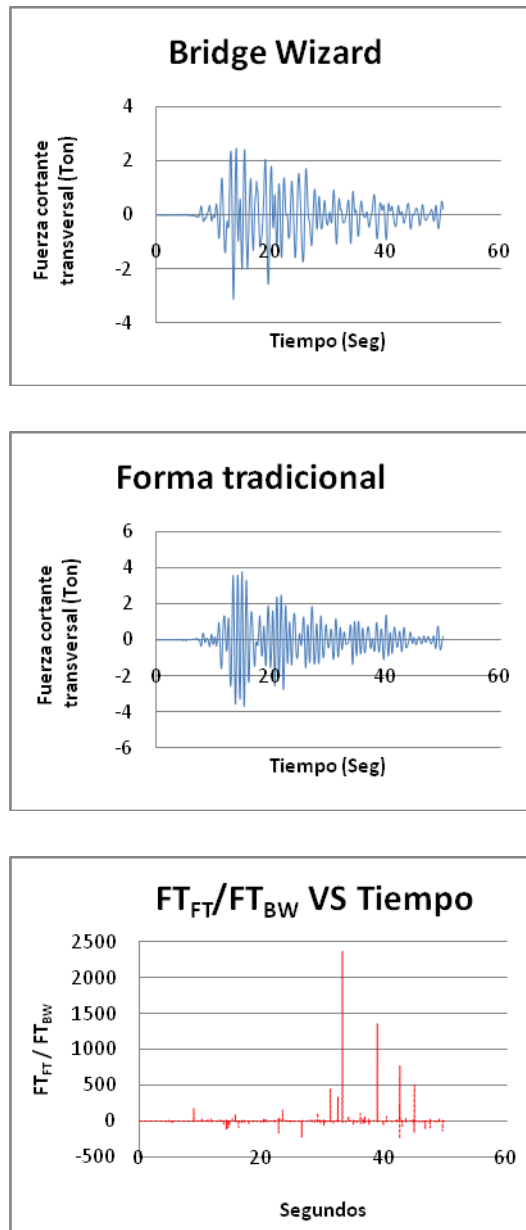


Figura 6.24 Fuerza cortante transversal en los apoyos de neopreno.



6.4.2 Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muro

Las tablas 9 y 10 presentan los máximos elementos mecánicos sólo en sentido longitudinal en las pilas tipo muros modelados con elementos finitos, mientras que las tablas 11 y 12 muestran estos elementos para los muros modelados como elementos tipo “Frame” así como las máximas respuestas estructurales en los apoyos de neopreno para estos tipos de modelos.

Tabla 9 Respuesta estructural de los muros, elementos finitos.

Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muros							
Modelo	Modelo usado para los muros	Muros					
		Fuerza máxima (Ton)		Momento máximo (Ton-m)		Fuerza cortante máxima (Ton)	
		Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo
Bridge Wizard	Elemento finito	3.6080	13.4600	108.2342	18.0000	15.17800	18.0000
Forma tradicional	Elemento finito	20.4633	13.4400	215.6670	18.1000	33.6142	18.1200

**Tabla 10 Respuesta de los apoyos de neopreno.**

Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muros					
Modelo	Modelo usado para los muros	Apoyos de neopreno			
		Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)	
		Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo
Bridge Wizard	Elemento finito	0.0431	14.9200	8.6152	14.9200
Forma tradicional	Elemento finito	0.0410	15.3000	8.2060	15.3000

Tabla 11 Respuesta estructural de los muros, elementos tipo "Frame".

Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muros							
Modelo	Modelo usado para los muros	Muros					
		Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)		Momento alrededor del eje longitudinal (Ton-m)	
		Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo
Forma tradicional	Elementos tipo Frame	0.03222	18.04	163.6565	18.04	291.5906	13.44

**Tabla 12 Comportamiento de los apoyos de neopreno.**

Puentes simplemente apoyados sobre apoyos de neopreno y pilas tipo muros					
Modelo	Modelo usado para los muros	Apoyos de neopreno			
		Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)	
		Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo
Forma tradicional	Elementos tipo Frame	0.04029	14.92	8.05857	14.92

Las figuras 6.25 a 6.27 se muestran la fuerza máxima, los momentos máximos y los cortantes máximos en los muros modelados con elementos finitos, mientras que en las figuras 6.28 a 6.31 se presentan los comportamientos estructurales de los apoyos de neopreno para este tipo de modelos.

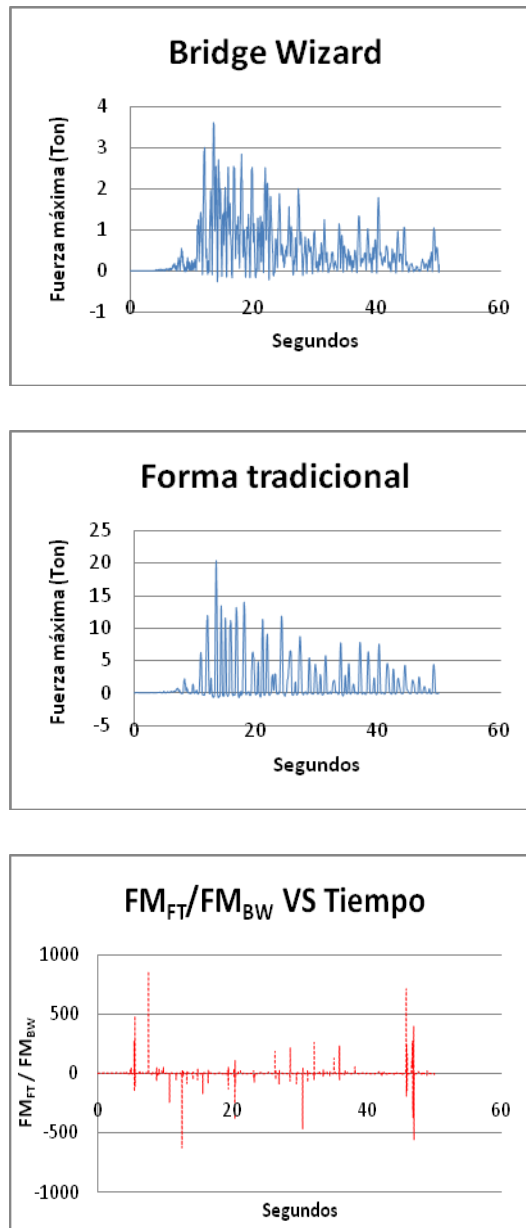


Figura 6.25 Fuerzas máximas en las columnas, elementos finitos.

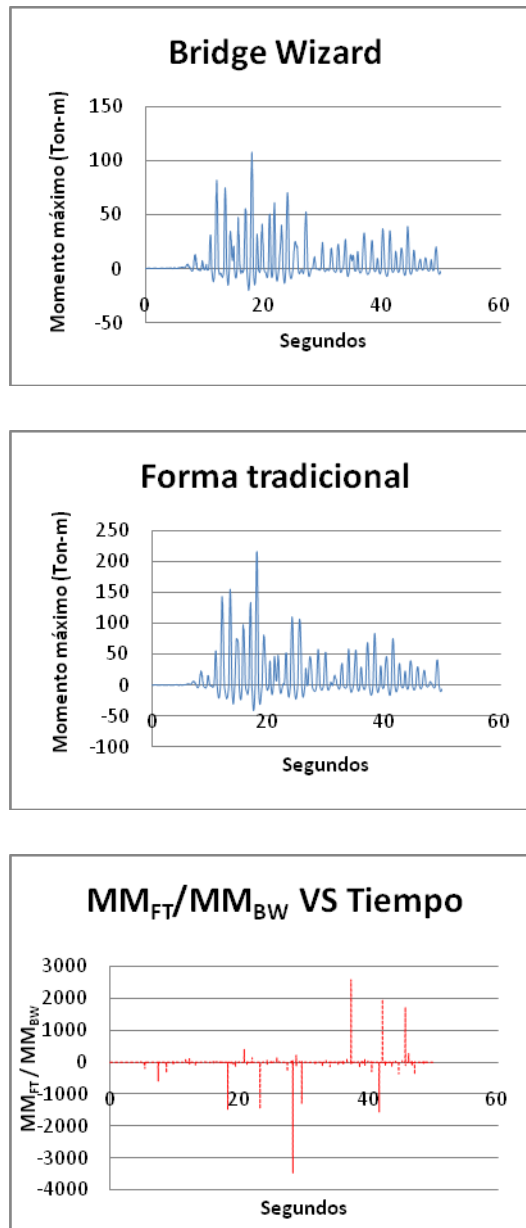


Figura 6.26 Momentos máximos en las columnas, elementos finitos.

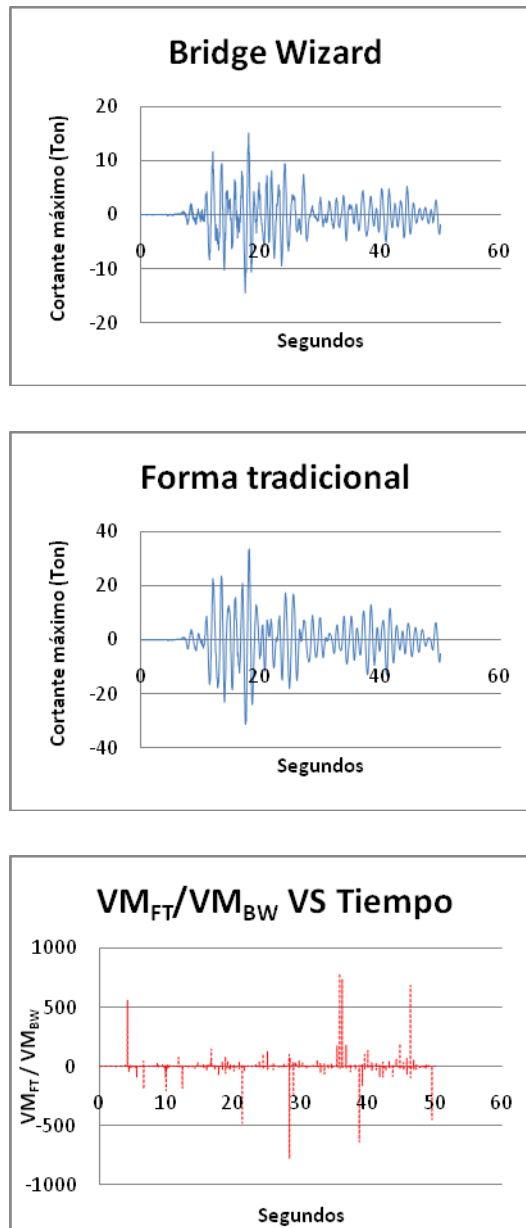


Figura 6.27 Cortantes máximos en las columnas, elementos finitos.

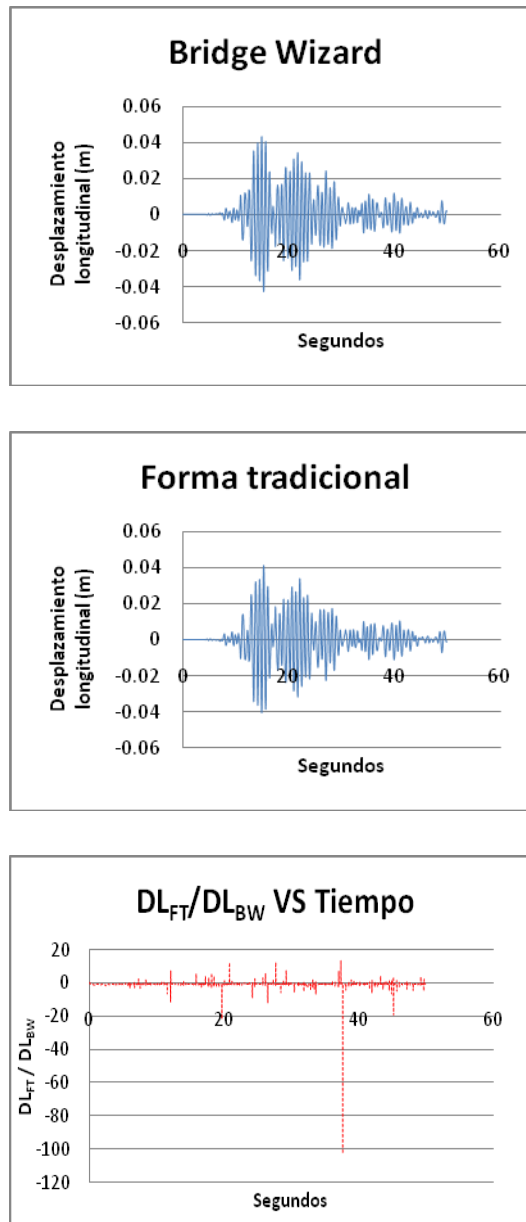


Figura 6.28 Desplazamientos longitudinales en los apoyos de neopreno.

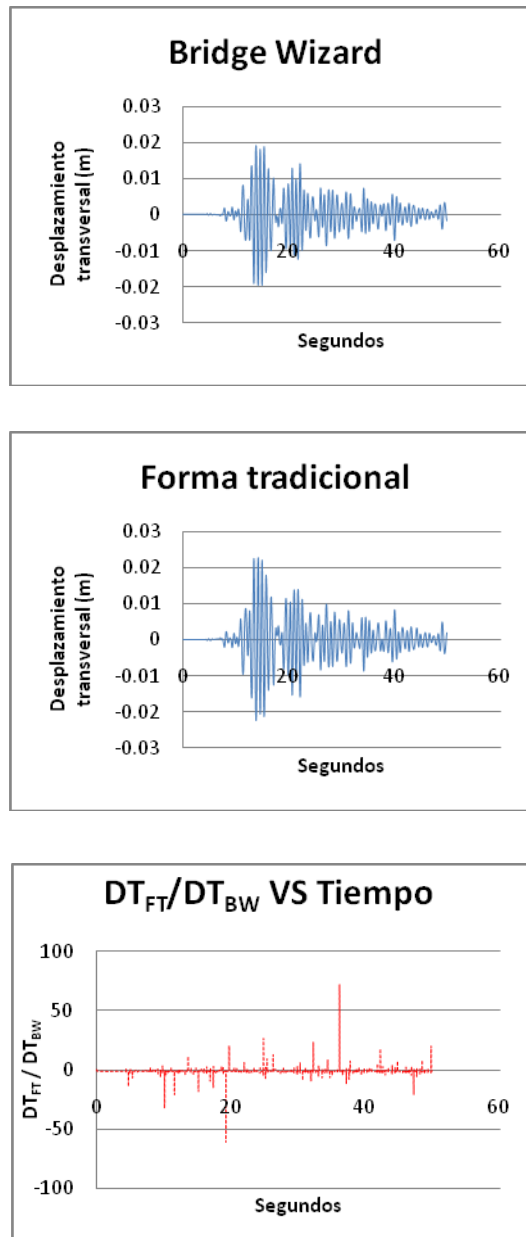


Figura 6.29 Desplazamientos transversales en los apoyos de neopreno.

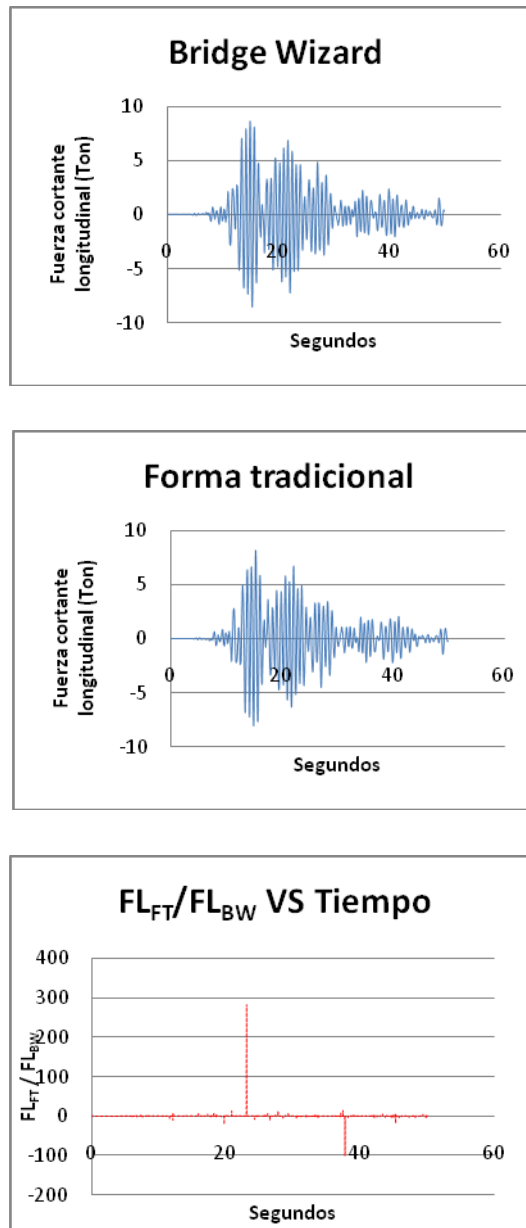


Figura 6.30 Fuerzas cortantes longitudinales en los apoyos de neopreno.

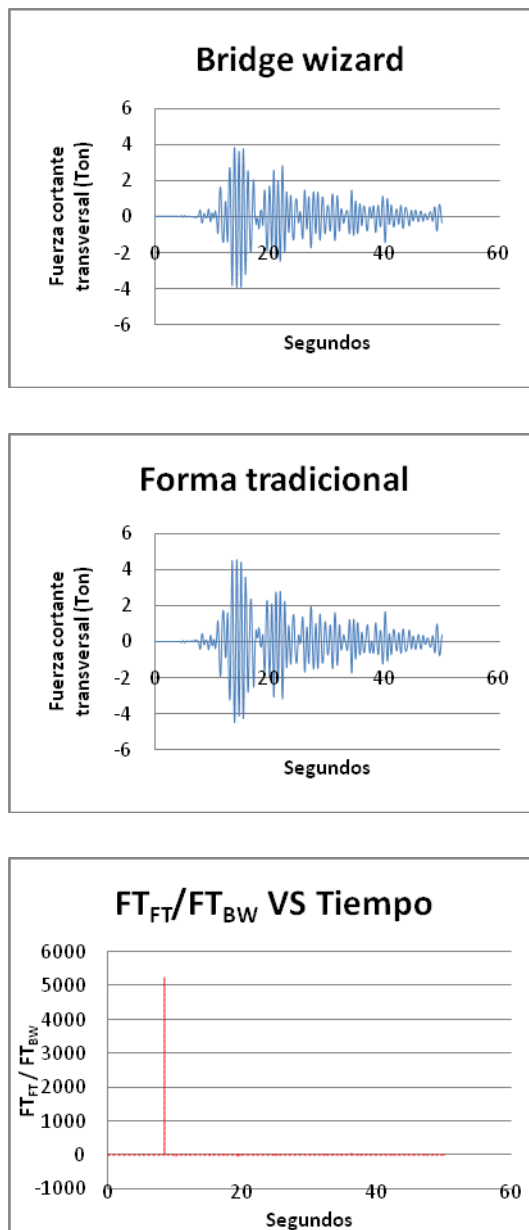


Figura 6.31 Fuerzas cortantes transversales en los apoyos de neopreno.

En las siguientes figuras, 6.32 a 6.36, se presentan los comportamientos estructurales en el tiempo para el modelo analítico realizado de la forma tradicional, en el cual las pilas tipo muro se modelaron como elementos tipo “Frame”, así como las respuestas de los apoyos de neopreno para este modelo.

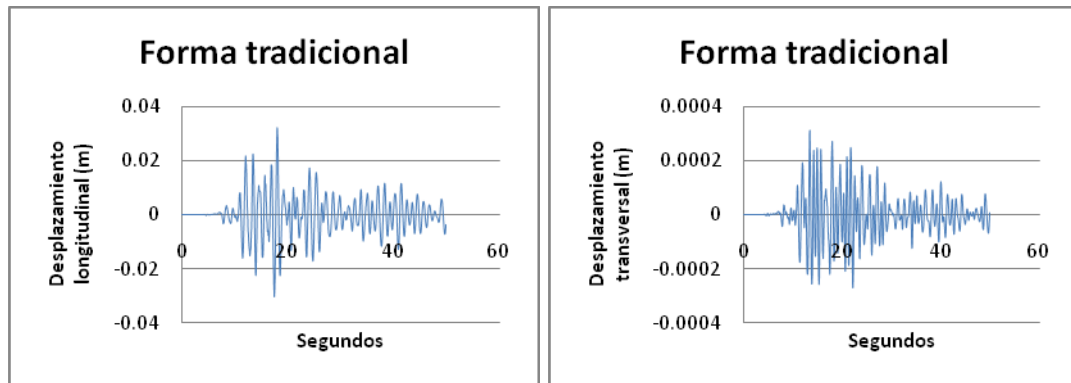


Figura 6.32 Desplazamientos en los muros.

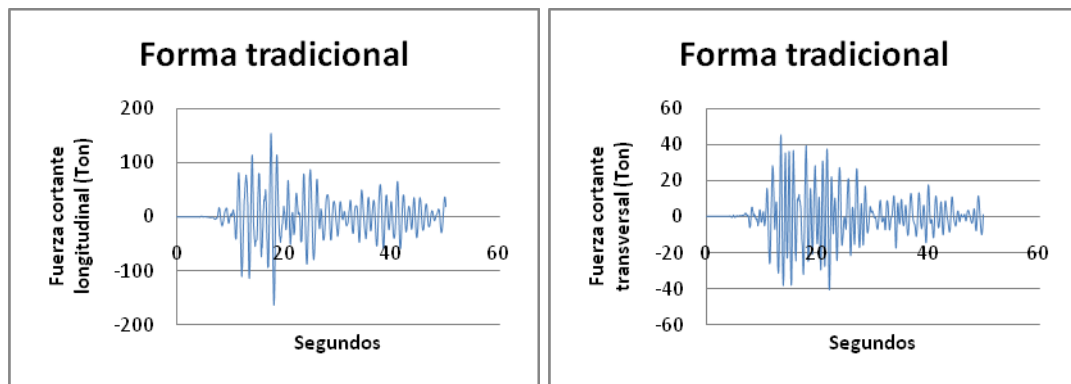


Figura 6.33 Fuerzas cortantes en los muros.

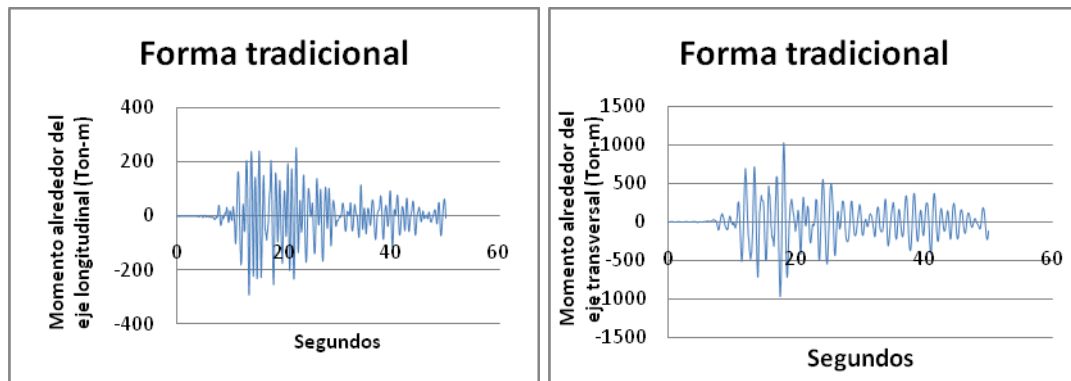


Figura 6.34 Momentos en los muros.

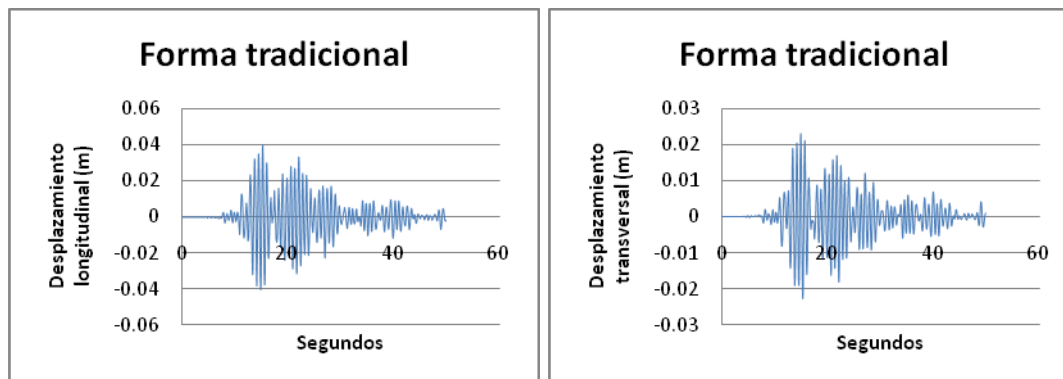


Figura 6.35 Desplazamientos en los apoyos de neopreno.

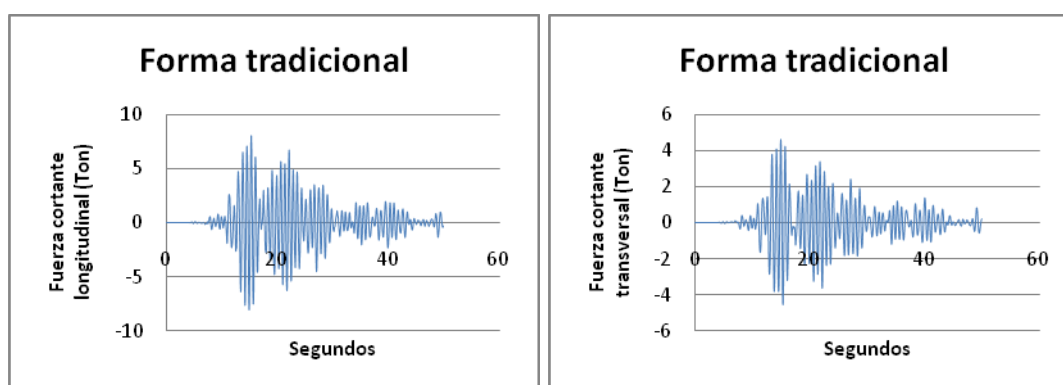


Figura 6.36 Fuerzas cortantes en los apoyos de neopreno.

6.4.3. Puentes continuos sobre apoyos de neopreno

Los máximos elementos mecánicos en dirección longitudinal en las columnas y en los apoyos de neopreno de los puentes modelados como continuos se muestran en las tablas 13 y 14.

**Tabla 13 Respuesta estructural de las columnas.**

Puentes continuos sobre apoyos de neopreno						
Modelo	Columnas					
	Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)		Momento alrededor del eje longitudinal (Ton-m)	
	Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo
Bridge Wizard	0.00585	18.0000	82.51892	18.0000	229.41388	18.0200
Forma tradicional	0.00435	18	80.92093	18	141.12027	17.44

Tabla 14 Respuesta de los apoyos de neopreno.

Puentes continuos				
Modelo	Apoyos de neopreno			
	Desplazamiento longitudinal (m)		Fuerza cortante longitudinal (Ton)	
	Máximo	Tiempo	Máximo	Tiempo
Bridge Wizard	0.04845	18.0200	9.68981	18.0200
Forma tradicional	0.04881	14	9.76129	14

En las figuras 6.37 a 6.44 se ilustran los comportamientos estructurales de las columnas y de los apoyos, así como las diferencias que presentan los dos tipos de modelos; con ayuda de la herramienta Bridge Wizard y de la forma tradicional correspondiente a los puentes continuos.

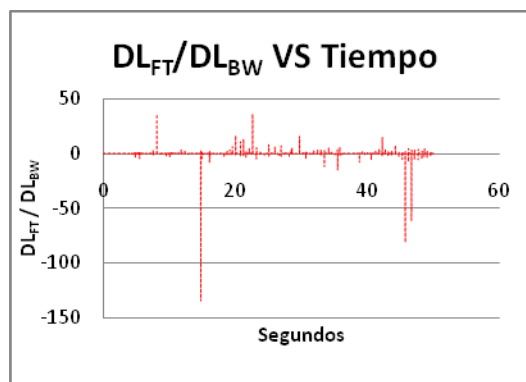
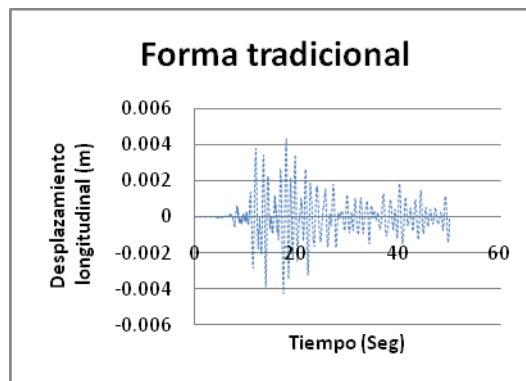
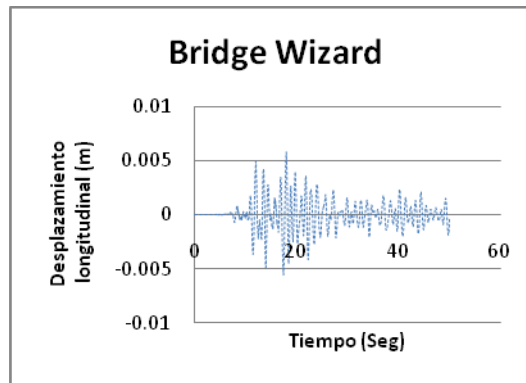


Figura 6.37 Desplazamientos longitudinales en columnas.

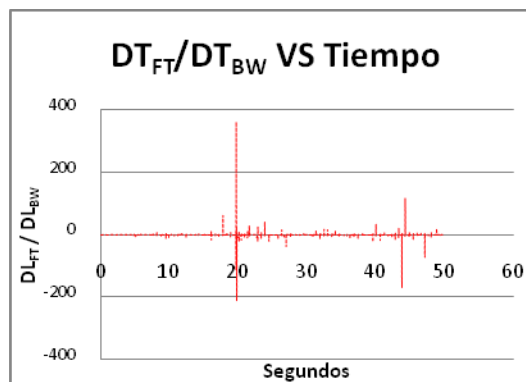
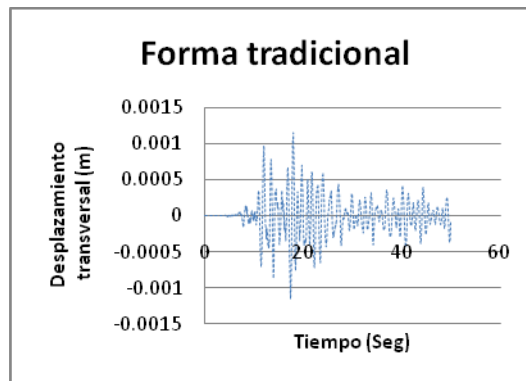
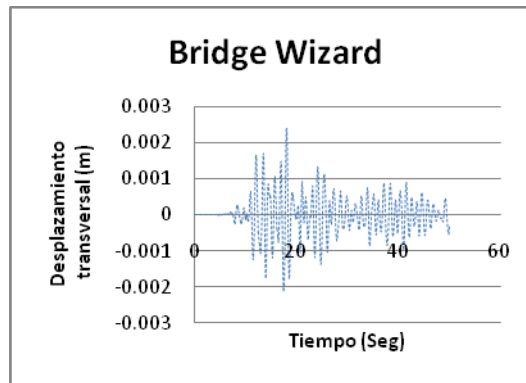


Figura 6.38 Desplazamientos transversales en columnas.

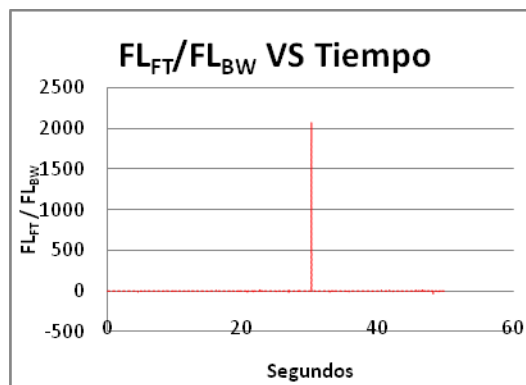
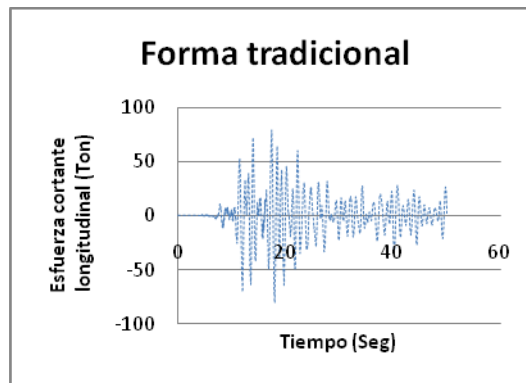
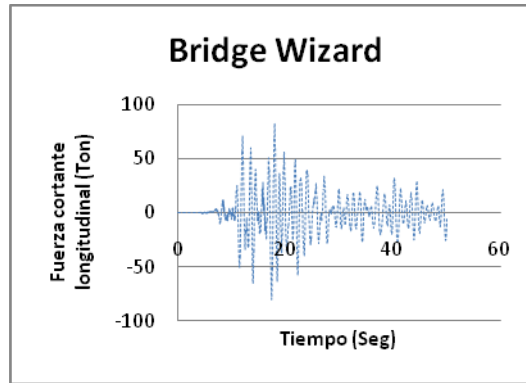


Figura 6.39 Fuerzas longitudinales en columnas.

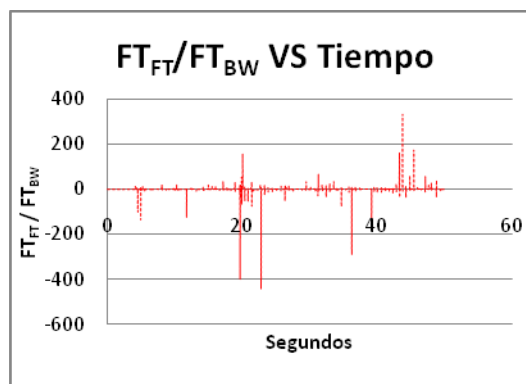
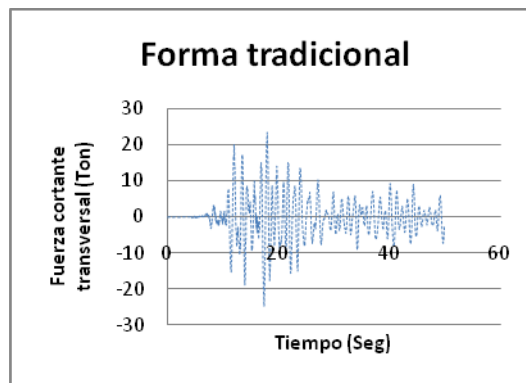
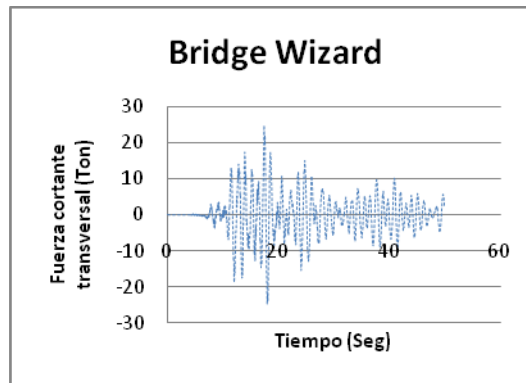


Figura 6.40 Fuerzas transversales en columnas.

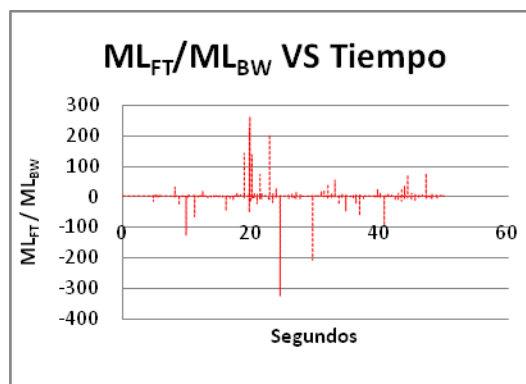
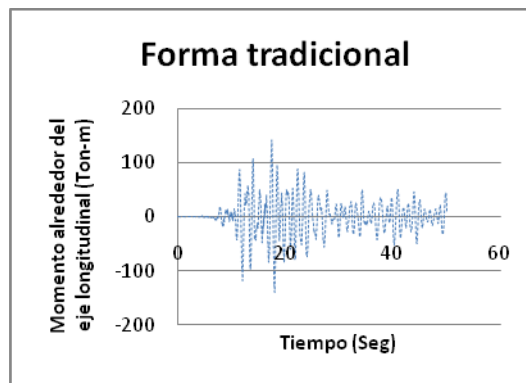
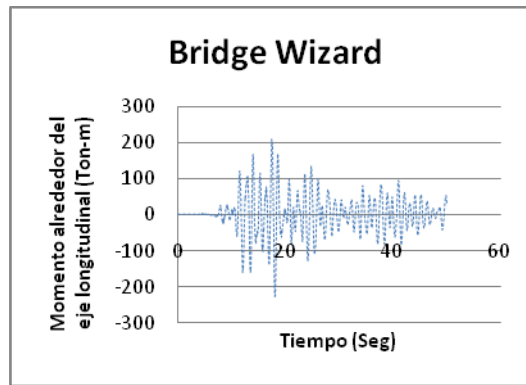


Figura 6.41 Momentos longitudinales en columnas.

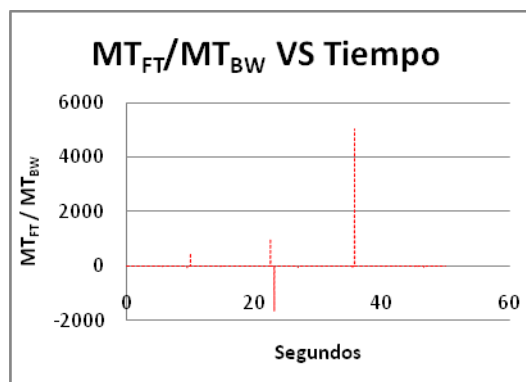
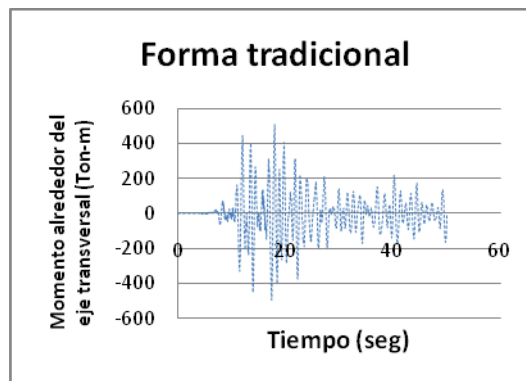
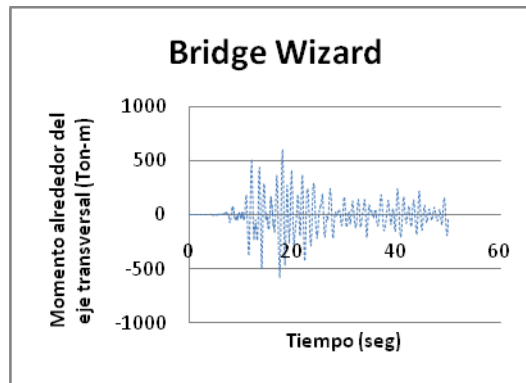


Figura 6.42 Momentos transversales en columnas.

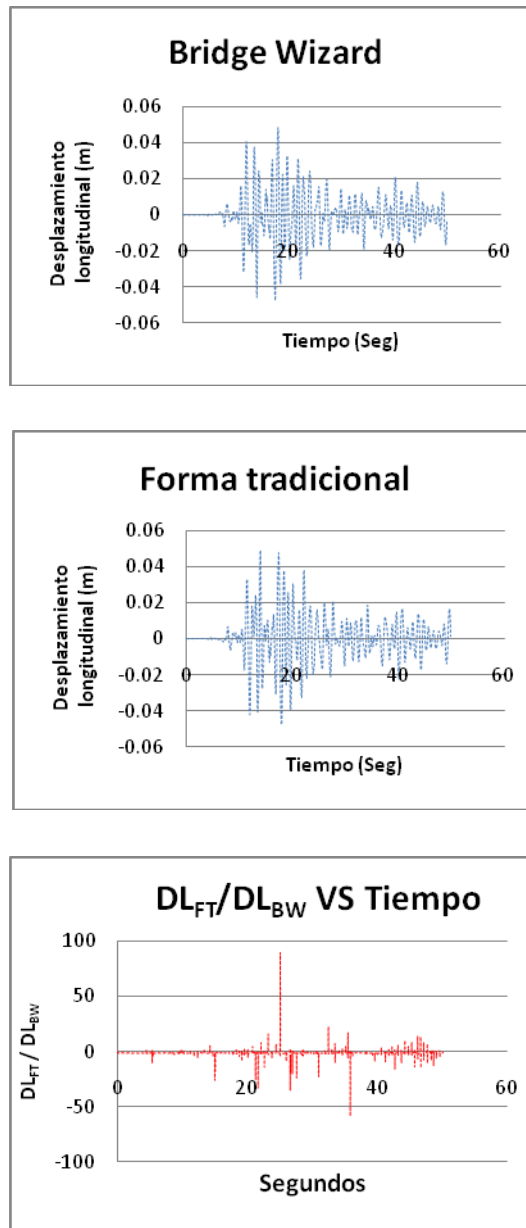


Figura 6.43 Desplazamientos longitudinales en apoyos de neopreno.

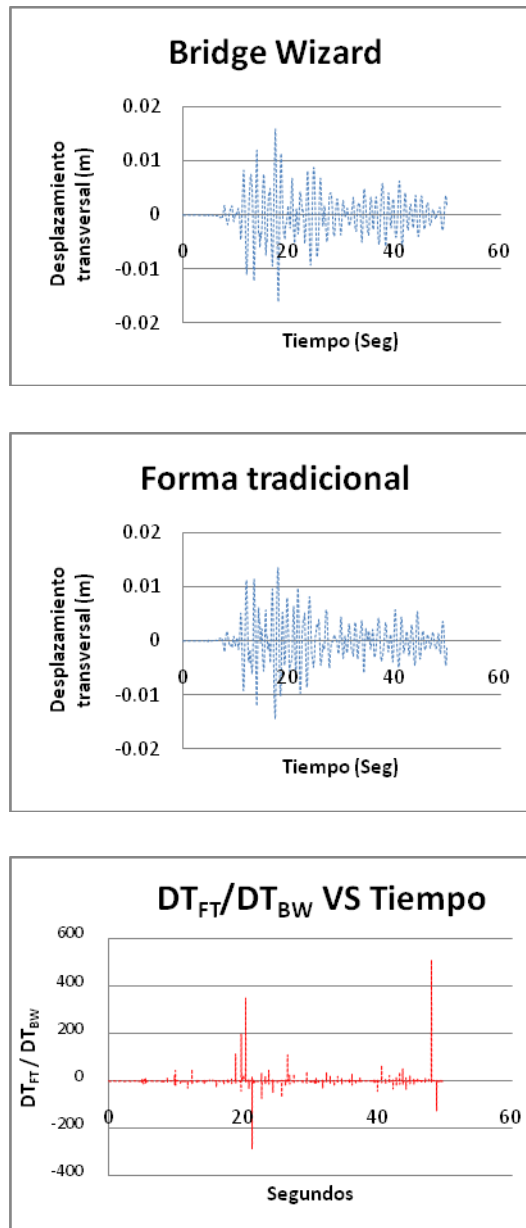


Figura 6.44 Desplazamientos transversales en apoyos de neopreno.



Capítulo VII

7. Conclusiones

Los modelos analíticos que se realizaron de forma tradicional y con ayuda de la herramienta “Bridge Wizard” tienen propiedades dinámicas muy similares, en consecuencia presentan casi los mismos elementos mecánicos máximos en las columnas y en los apoyos de neopreno, así mismo, estos elementos mecánicos se presentaron en tiempos semejantes.

Las gráficas que presentan los comportamientos estructurales en el tiempo de las columnas y de los apoyos de neopreno, en las dos formas de proceder para realizar los modelos analíticos, muestran mínimas diferencias. Estas pequeñas diferencias se presentan en las gráficas que muestran las relaciones que existen entre la forma tradicional y con la ayuda del “Bridge Wizard” (FT/BW). En estas gráficas se presentan algunas relaciones muy grandes, ya que, los intervalos de tiempo son muy pequeños y pequeñas diferencias de tiempo en las respuestas hacen que estas relaciones presenten un valor grande para estas relaciones.

Podemos concluir que tanto los modelos analíticos realizados de la forma tradicional y los desarrollados con ayuda de la herramienta Bridge Wizard arrojan comportamientos o respuestas estructurales muy similares, es decir, no existen diferencias significativas en las dos formas de proceder en cuanto a la respuesta estructural final. La diferencia esencial radica en el tiempo que se debe dedicar para realizar un modelo analítico de un puente, con la herramienta “Bridge Wizard” y en la forma tradicional. Otra importante diferencia es con respecto a que la herramienta “Bridge Wizard” presenta una secuencia a seguir en la que va indicando las partes del puente que se deben ir definiendo de



manera secuencial con el modelo analítico apropiado, mientras que el modelado en forma tradicional requiere que el usuario conozca bien los elementos que conforman un puente y el tipo de herramienta del programa a utilizar para su correcto modelado.



Capítulo VIII

8. Bibliografía

Bazán, E. y Meli, R. (2001). Diseño sísmico de edificios. México: LIMUSA, S. A. de C. V.

Crespo, V. C. (2004). Vías de comunicaciones: caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos. México: LIMUSA, S. A. de C. V.

CSI (2006) SAP2000. “Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Desing of Three-Dimensional Structures”, version 11, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, USA.

Meli, R. (2008). Diseño estructural. México: LIMUSA, S.A. de C. V.

Paz, M. (1992). Dinámica estructural. Teoría y Cálculo. España: REVERTÉ, S. A.

<http://www.wikimedia.org>.

<http://www.construaprende.com>.

<http://www.mexpresa.com>.



<http://www.hormigoma.com>.

<https://wiki.csiberkeley.com/display/kb/Bridge+bent+FAQ>.