

*Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas*



ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PUENTE DE LA CIRCUNVALACIÓN SOBRE EL RÍO SAN JUAN

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Robert Tomás Castro Tandrón

Tutores: MSc. Ing. Alejandro Hernández Hernández

Ing. Reynaldo Giraldez Toledo

Matanzas, 2020

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Yeila y Osvaldo a mi familia por haberme apoyado de una forma u otra en el desarrollo de este trabajo.

A mis tutores Reynaldo Giraldez Toledo y Alejandro Hernández Hernández por la ayuda incondicional para lograr el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y compañeros que han estado siempre presente y brindado su apoyo.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

El puente de carretera de la Circunvalación de la Ciudad de Matanzas sobre el Río San Juan, ramal de la carretera central en el km 98 a La Jaiba, desempeña un papel fundamental en la economía y transportación de la región. Actualmente es la vía de comunicación y comercio más utilizada entre las provincias de La Habana y Matanzas, que permite mayor velocidad y comodidad de conducción, pues como esta bordea en lugar de atravesar la ciudad, evita los tráficos de la misma. Con el paso de los años este puente ha sufrido intervenciones de mayor y menor grado y actualmente no se tiene certeza de la capacidad estructural del puente. Para este estudio se realiza la modelación estructural del puente y se analiza el efecto de las cargas móviles sobre la estructura, utilizando el software CSiBridge, teniendo en cuenta la velocidad del material móvil que por ahí transita y el resto de las cargas que actúan en la estructura, para obtener los desplazamientos y deformaciones que ocurren bajo los esquemas de cargas propuestos.

Palabras claves: Puente; modelación; cargas móviles; capacidad estructural.

ABSTRACT

The Matanzas City Ring Road bridge over San Juan River, central highway branch at km 98 to La Jaiba, plays a fundamental role in the economy and transportation of the region. Currently, it is the most controlled communication and commerce route between the provinces of Havana and Matanzas, which allows greater speed and driving comfort, since as it borders instead of crossing the city, it avoids traffic. Over the years, this bridge has problems of greater and lesser degree and currently it is not certain of the structural capacity of the bridge. For this study, the structural modeling of the bridge is carried out and the effect of moving loads on the structure is analyzed, using the CSiBridge software, taking into account the speed of the mobile materials passing through it and the rest of the loads acting on the structure, to obtain the displacements and deformations that occur under the proposed load schemes.

Key words: Bridge; modeling; mobile uploads; structural capacity.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 Análisis del estado del arte de la modelación computacional y el análisis dinámica.....	6
1.1 Modelado computacional	6
1.1.1 Antecedentes del tema	6
1.2 Hormigón pretensado	8
1.2.1 Presfuerzo	9
1.2.2 Hormigón pretensado.....	9
1.2.3 Hormigón postesado	10
1.3 Análisis dinámico.....	10
1.3.1 Vibraciones	12
1.3.2 Frecuencia natural.....	14
1.3.3 Resonancia	15
1.3.4 Cargas dinámicas	16
1.4 Cargas en puentes de carretera.....	18
1.4.1 Carga de viento	19
1.4.2 Carga sísmica.....	20
1.4.3 Carga de vehículos.....	23
1.5 Método de elementos finitos (MEF)	24
1.5.1 Método de Galerkin	25
1.5.2 La malla de elementos finitos	25
1.6 Modelación estructural.....	27
1.6.1 Ventajas y desventajas de la modelación computacional	27
1.7 Conclusiones parciales	28
Capítulo 2 Modelación del puente de la circunvalación sobre el Río San Juan	30
2.1 Geometría.....	30
2.2 Materiales	31
2.3 Secciones.....	32
2.4 Vínculos	33
2.5 Postesado.....	34
2.6 Modelo del puente.....	35
2.7 Estados de cargas	38
2.8 Validación del modelo	39
2.9 Calibración de la malla.....	42
2.10 Conclusiones parciales	45
2.11 Resultados esperados	46
Conclusiones	47
Recomendaciones	48
Referencias Bibliográficas	49

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad el ser humano se ha topado con la necesidad de salvar obstáculos naturales tales como ríos o valles. Como solución estructural a este problema surgen los puentes, que hoy día no solo se han convertido en un elemento muy básico para la sociedad, sino que representan un símbolo de su capacidad tecnológica.

Los primeros puentes que se construyeron no eran mas que plataformas horizontales sujetadas en sus extremos por elementos tales como piedras o troncos. Años más tarde este tipo de construcciones se fue modernizando pero seguían utilizando el mismo mecanismo resistente, plataformas horizontales elevadas a una cierta altura por sus extremos.

La ciudad de Matanzas, conocida como la ‘‘Atenas de Cuba’’, se encuentra enmarcada entre los ríos Yumurí, San Juan y Canímar de ahí que cuente con alrededor de 30 puentes (Arestuche and Pérez, 2009) por lo que es llamada también ‘‘Ciudad de los Puentes’’. Existe gran variedad entre ellos, con respecto a su uso, materiales y estructura; puentes vehiculares, de ferrocarril, de armaduras, de arcos y mixtos forman parte icónica de la ciudad.

Con el pasar de los años estas obras de fábrica se ven afectadas por el ambiente agresivo, eventos meteorológicos y la variación de las cargas que por ellos circulan; es por esto que se hallan con un alto grado de deterioro, a pesar de las acciones de mantenimiento que se han tomado para prolongar su vida útil.

El puente situado en la Carretera Circunvalación Matanzas, sobre el Río San Juan fue construido a principios de la década del 60. Ejecutado totalmente in situ, su longitud es de 90.80 m con una luz central de 61.0 m y voladizos a ambos lados de 13.0 m, con losas de transición de 1.90 m (Toro et al., 1997). Con el paso de los años el mismo ha sido sometido a modificaciones y reparaciones.

En el año 1965 el puente es sometido a una modificación donde se cambia el sistema de postesado por el Dr. Ing. M Isoba. En la fecha del 3 de julio de 1976 se realiza una inspección a cargo de los Ing. E Marín, J.M Iglesias, Sandalio Martínez y Alfredo Vidal. El 13 de abril

de 1984 se realiza una reparación de dicho puente producto de una visita de inspección realizada por los Ing. M Isoba y Carlos Lincheta.

En visita de inspección realizada con fecha octubre de 1997 por los Ing. Augusto Clement A. del Toro, Nicolás Fernández y Laura R Domínguez se detectaron afectaciones tales como: cables partidos y corroídos del sistema de postesado, grietas en los diafragmas y otras en casi todas las monturas metálicas que permiten el paso de los cables, fisuras en las paredes externas e intermedias del cajón, parte de las losas de transición afectadas, pérdida total en ambos estribos de la losa fondo de voladizo y muros laterales de la cámara de estiramiento.

El 7 de diciembre de 2018 se realiza nuevamente una inspección, donde se detectan incrementos en las mismas afectaciones que en la anterior, además de un aumento de los cables partidos que en conjunto con los anteriormente detectados hacen una pérdida total de 89 cables que representan el 5.15% de los 1728 cables con los que contaba el puente inicialmente. (Delgado, 2018)

El paso del tiempo y la falta de mantenimientos periódicos, así como ciertas indisciplinas sociales, han propiciado que la estructura del Puente de la Circunvalación sobre el Río San Juan sufriera ciertos deterioros que han sido tratados en mayor o en menor medida. Actualmente se desconoce su capacidad estructural real lo que genera como **situación problémica** la inexistencia de estudios recientes que demuestren la capacidad estructural del puente, ante las nuevas cargas de circulación y los deterioros que presenta en la actualidad.

Debido a que el puente fue diseñado en su época según la norma AASHTO para el vehículo HS-20 y la normativa actual dictamina vehículos de diseño NK-80 y MS-32; se plantea como **problema científico** que en las condiciones actuales no se puede asegurar la seguridad estructural del Puente de la Circunvalación sobre el Río San Juan, por lo cual se hace necesario emplear herramientas de modelación numérica computacional para obtener la capacidad de carga actual.

Ante esta situación se establece como **hipótesis** que, si se emplean modelos numéricos computacionales capaces de describir el comportamiento estructural del Puente de la

Circunvalación sobre el Río San Juan ante la acción de las cargas actuales, se podría obtener la capacidad estructural actual y la disminución de esta con respecto a su diseño original

En correspondencia con lo expresado, para darle solución al problema planteado se define como **objetivo general:** analizar el comportamiento estructural del Puente de la Circunvalación sobre el Río San Juan ante la acción de las cargas actuales y la influencia de los deterioros sobre el mismo.

Para garantizar la realización del mismo se trazan los siguientes **objetivos específicos:**

- Definir el estado del arte referente a la modelación computacional y al análisis estructural de puentes de carretera.
- Elaborar modelos numéricos computacionales del Puente de la Circunvalación sobre el Río San Juan

Tareas de la investigación:

- Definición del estado del arte referente al análisis dinámico de estructuras y modelación estructural.
- Elaboración de modelos computacionales.

Métodos científicos:

Analítico-sintético: Establece la relación recíproca entre el análisis y la síntesis. Analizar significa desmembrar en sus partes constituyentes a un objeto o fenómeno de la realidad objetiva para su mejor comprensión, mientras que la síntesis se refiere a la integración nuevamente de sus partes, en un proceso inverso. Todo lo referido ocurre a nivel de pensamiento, posibilitando una interpretación más acabada de tales objetos y fenómenos en todas sus partes e integración.

Inductivo-deductivo: Mediante la inducción se lleva a cabo un proceso donde el pensamiento va de las partes que constituyen un objeto o fenómeno hasta el todo, mientras que la deducción es el camino contrario. Es así como inducción quiere decir ir de las partes al todo y deducción significa ir del todo a las partes. A nivel del pensamiento este método posibilita una mejor comprensión e interpretación del objeto de investigación con el cual se trabaja.

Histórico-lógico: Se refiere a la historicidad y a la lógica implícita en la investigación, sobre todo a la que se corresponde con el problema científico objeto de estudio. Este método posibilita emprender un trabajo basado en la sistematicidad que favorece el ordenamiento y la comprensión del texto científico y la propia lógica del fundamento en el cual este se sustenta.

Hipotético-deductivo: Hipótesis y deducciones constituyen una unión inseparable que acompaña a toda investigación. La hipótesis es la respuesta anticipada del problema científico que se aborda en la investigación, la cual se logra a través de deducciones. Este método, aunque no se excluye de ningún tipo de investigación científica, por lo general se declara únicamente cuando se emplea una hipótesis como parte del diseño teórico del trabajo científico que se realiza.

Modelación: Se refiere a la utilización de un modelo que imita a la realidad a una escala por lo general reducida (modelo icónico), o que entra en analogía con esa realidad (modelo analógico), existiendo además los llamados modelos teóricos. En la actualidad es posible emplear modelos analógicos a partir de las posibilidades que ofrecen las computadoras y modelos teóricos a partir de comprobaciones matemáticas. Con tales modelos se trabaja y se experimenta, por lo que los mismos sustituyen la labor directa del investigador sobre la realidad que es objeto de investigación. Muchos especialistas consideran que también son modelos aquellas proyecciones que anteceden un resultado, sirviendo de punto de partida para su elaboración definitiva.

Enfoque sistémico: Se refiere a la concepción sistémica que se adopta en la investigación al considerar a los objetos y fenómenos de la realidad objetiva como un todo, integrado por partes constituyentes que se encuentran interrelacionadas estructural y funcionalmente. Ello supone que un cambio en una de las partes del todo, repercute en sus otras partes y en el

propio sistema como un todo. Para algunos autores este método debe llamarse sistémico estructural.

Estructura de la tesis:

Capítulo 1

En este capítulo queda recogido el estado del arte, donde se establecen los conceptos fundamentales basados en la información de los materiales recopilados, estos son:

- Análisis dinámico
- Cargas en puentes
- Elementos finitos
- Modelación estructural

Capítulo 2

Se realiza la modelación del puente utilizando el software CSiBridge, teniendo en cuenta su geometría, vínculos estructurales, materiales y las cargas móviles que afectan la estructura.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

CAPÍTULO 1 ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN COMPUTACIONAL Y EL ANÁLISIS DINÁMICA

Capítulo 1 Análisis del estado del arte de la modelación computacional y el análisis dinámico

Este capítulo tiene como objetivo analizar el estado del arte referente al análisis dinámico de las estructuras y la modelación computacional; definiendo conceptos como cargas dinámicas, vibraciones, oscilaciones naturales y elementos finitos, teniendo en cuenta las cargas que se producen en puentes.

1.1 Modelado computacional

El modelado computacional es el uso de computadoras para simular y estudiar el comportamiento de sistemas complejos mediante las matemáticas, la física y la informática. Un modelo computacional contiene numerosas variables que caracterizan el sistema bajo estudio. La simulación se realiza ajustando cada una de estas variables, solas o combinadas, y observando cómo los cambios afectan los resultados. Los resultados de las simulaciones de modelos ayudan a los investigadores a hacer predicciones acerca de qué pasará en el sistema real que se está estudiando en respuesta a condiciones cambiantes. (Bioengineering, 2016)

1.1.1 Antecedentes del tema

La modelación computacional y el análisis de las cargas dinámicas, suscita gran interés por su aplicación en distintas temáticas de la ingeniería civil, por ejemplo, el estudio de los efectos de los sismos sobre edificios altos, el comportamiento de las torres de alta tensión ante la acción del viento, etc.

Centrándose el tema en el comportamiento de los puentes ante la acción de cargas móviles, existen diversas investigaciones como: Simulación de cargas móviles sobre estructuras mediante un mallado móvil de elementos finitos, de M. Such 2014, donde el autor presenta

una metodología para analizar la respuesta dinámica de estructuras sometidas a cargas móviles.

En el libro del año 2019 *Desarrollo e Innovación en Ingeniería, Cuarta Edición*, de la editorial *Instituto Antioqueño de Investigación*, se hace un análisis, en el software MIDAS CIVIL, del comportamiento a largo plazo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos en Colombia a partir de deflexiones medidas en campo, arrojando como resultado la importancia del estudio de los materiales, el cambio en las condiciones climáticas y el uso de una contra flecha en el diseño, pues las deflexiones generadas a largo plazo son generalmente superiores a las concebidas inicialmente, impidiendo que este alcance el plazo de vida útil esperado.

En el artículo del año 2018 *Modal identification of a box girder bridge using optimally selected measured data from ambient vibration testing*, de la revista *UIS Ingenierías*, se presenta un estudio donde se implementan un algoritmo de óptima localización de sensores y un método de identificación modal con base en mediciones en condiciones de excitación ambiental del puente tipo cajón *Gómez Ortiz* ubicado en Colombia, utilizando el software MIDAS CIVIL. Los resultados presentados en este artículo, con un número limitado de sensores, muestran buena correlación con los resultados utilizados en la calibración del modelo numérico del puente previamente desarrollado y que corresponde a la línea base del puente, con lo que se evidencia la importancia de complementar los estudios numéricos preliminares a las campañas de mediciones, con resultados de configuraciones resultantes de la implementación de algoritmos de óptima localización de sensores. El tipo de excitación dominante en un puente debe ser estudiado de igual forma antes de las campañas de medición; se debe determinar de igual forma la dirección de excitación dominante.

En Cuba se han llevado a cabo varios estudios sobre esta temática pudiendo mencionar, *Análisis Estructural de un Puente en la Autopista Matanzas – Varadero. Modelación y Análisis de su Capacidad de Alfonso Pérez 2006* donde se analiza la respuesta del puente ante la acción de las nuevas cargas del tráfico, utilizando el software SAP 2000. *Rodríguez Cruz* presentando *Métodos para el análisis dinámico de puentes frente a cargas móviles* realiza una comparación entre los métodos clásicos de análisis dinámico en puentes de ferrocarril y método de integración directa con cargas móviles.

En este trabajo se propone analizar el comportamiento de la estructura ante la acción de las cargas reales que hoy lo afectan. El principal aporte de este trabajo es la aplicación del software CSiBridge en el análisis de la capacidad estructural del puente.

1.2 Hormigón pretensado

Se denomina hormigón pretensado (en algunos lugares de Hispanoamérica concreto preesforzado) a la tecnología de construcción de elementos estructurales de hormigón sometidos intencionadamente a esfuerzos de compresión previos a su puesta en servicio. Dichos esfuerzos se consiguen mediante barras, alambres o cables de alambres de acero que son tensados y anclados al hormigón.

Esta técnica se emplea para superar la debilidad natural del hormigón frente a esfuerzos de tracción (G.Nawy, 1989), y fue patentada por Eugène Freyssinet en 1920.

El objetivo es el aumento de la resistencia a tracción del hormigón, introduciendo un esfuerzo de compresión interno que contrarreste en parte el esfuerzo de tracción que producen las cargas de servicio en el elemento estructural.

La resistencia a la tracción del hormigón convencional es muy inferior a su resistencia a la compresión, del orden de 10 veces menor. Teniendo esto presente, es fácil notar que emplear el hormigón en elementos, que bajo cargas de servicio deban resistir tracciones, es necesario encontrar una forma de suplir esta falta de resistencia a la tracción.

En el hormigón armado convencional se proporciona resistencia a la tracción a los elementos estructurales colocando acero de refuerzo (pasivo) en las zonas de los elementos estructurales donde pueden aparecer tracciones. Esta forma de proporcionar resistencia a la tracción puede garantizar una resistencia poco adecuada al elemento y presenta el inconveniente de no impedir el agrietamiento del hormigón para ciertos niveles de carga. En el hormigón pretensado se coloca acero tensado (activo) que pre comprime el hormigón, permitiendo así que los elementos estructurales tengan una gran resistencia a la tracción con la ventaja de impedir el agrietamiento del hormigón. (Nilson, 1987)

1.2.1 Presfuerzo

El esfuerzo de pretensado se puede transmitir al hormigón:

- Mediante armaduras pretesas (*pretesado*); generalmente barras o alambres que se tensan en un banco, se mantienen tensadas y se embeben dentro del molde en hormigón fresco para formar una pieza. Cuando el hormigón ha fraguado se sueltan los anclajes y el hormigón queda comprimido. éste es el método utilizado mayoritariamente en elementos prefabricados.
- Mediante armaduras postesas (*postesado*); generalmente cables compuestos por alambres que se introducen en conductos huecos dentro de las piezas de hormigón y se tensan cuando éste ya ha fraguado. Éste es el método utilizado principalmente para construir tableros de puentes y otras grandes estructuras cuando éstas se hormigonan "in situ".

Normalmente al aplicar esta técnica, se emplean hormigones y aceros de alta resistencia, dada la magnitud de los esfuerzos inducidos.

1.2.2 Hormigón pretesado

El hormigón se vierte alrededor de tendones tensados. Este método produce un buen vínculo entre el tendón y el hormigón, el cual protege al tendón de la oxidación, y permite la transferencia directa de tensión. El hormigón o concreto fraguado se adhiere a las barras, y cuando la tensión se libera, es transferida hacia el hormigón en forma de compresión por medio de la fricción. Sin embargo, se requieren fuertes puntos de anclaje exteriores entre los que el tendón se estira y los tendones están generalmente en una línea recta. Por lo tanto, la mayoría de elementos pretesados de esta forma son prefabricados en taller y deben ser transportados al lugar de construcción, lo que limita su tamaño. Elementos pretesados pueden ser elementos balcón, dinteles, losas de piso, vigas de fundación o pilotes.

1.2.3 Hormigón postesado

Es el término descriptivo para la aplicación de compresión tras el vertido y posterior proceso de secado in situ del hormigón. Cuando se ubica en el interior del molde de hormigón se coloca una vaina de plástico, acero o aluminio, para seguir el trazado más conveniente en el interior de la pieza, siguiendo la franja donde, de otra manera, se registrarían tracciones en el elemento estructural. Una vez que el hormigón se ha endurecido, los tendones se pasan a través de los conductos. Después dichos tendones son tensados mediante gatos hidráulicos que reaccionan contra la propia pieza de hormigón. Cuando los tendones se han estirado lo suficiente, de acuerdo con las especificaciones de diseño, estos quedan atrapados en su posición mediante cuñas u otros sistemas de anclaje y mantienen la tensión después de que los gatos hidráulicos se retiren, transfiriendo así la presión hacia el hormigón. El conducto es rellenado con grasa o lechada de cemento para proteger los tendones de la corrosión. Este método es comúnmente utilizado para crear elementos estructurales de obra civil o edificación sometidos a esfuerzos de tracción importantes. Por ejemplo, el postesado se utiliza en la construcción de puentes de hormigón, siendo prácticamente imprescindible en los sistemas de construcción por voladizos, empuje y dovelas prefabricadas, etc.

1.3 Análisis dinámico

Se refiere al análisis que se le realiza a una estructura sometida a oscilaciones y vibraciones alrededor de su punto de equilibrio. Las mismas son producidas por el efecto de cargas dinámicas provocando modificaciones en las tensiones y deformaciones de la estructura.

Todas las estructuras físicas reales se comportan dinámicamente cuando son sometidas a cargas o desplazamientos. Las fuerzas de inercia adicionales, de la "Segunda Ley de Newton", son iguales a la masa multiplicada por la aceleración. Si las cargas o desplazamientos son aplicadas muy lentamente, las fuerzas de inercia pueden ser despreciadas y un análisis de carga estática puede ser justificado. Por lo tanto, el análisis dinámico es una simple extensión del análisis estático.(Wilson, 2002)

Además, todas las estructuras reales tienen potencialmente un infinito número de desplazamientos. Es por ello que la fase más crítica de un análisis estructural es crear un modelo computacional con un número finito de miembros sin masa y un número finito de nodos (articulaciones) desplazados que simularán el comportamiento real de la estructura. La masa de un sistema estructural, que se puede estimar con precisión, es agrupada en los nodos. También, para estructuras elásticas lineales, las propiedades de rigidez de los miembros pueden ser aproximadas con un alto grado de confianza con la ayuda de datos experimental. Sin embargo, la carga dinámica, las propiedades de disipación de energía y condiciones límites son difíciles de estimar para muchas estructuras. Esto es siempre verdadero para los casos de entrada sísmica o cargas de viento.

Par reducir los errores que puedan ser causados por las aproximaciones resumidas en el anterior párrafo, es necesario realizar varios análisis dinámicos diferente usando diferentes modelos computacionales de carga y condiciones límites. Es muy común hacer simulaciones con 20 o más computadoras para diseñar una nueva estructura o para investigar opciones de retro adaptación para una estructura existente.

El análisis dinámico incluye estudiar tres aspectos importantes(García, 2017):

- Análisis modal.
- Análisis de las solicitaciones exteriores.
- Análisis de las fuerzas dinámicas inducidas.

El análisis modal es el proceso mediante el cual se determinan las características inherentes de la estructura necesaria para la formulación de un modelo matemático de comportamiento dinámico. Este modelo se lleva a cabo sobre la base de parámetros modales propios de la estructura como son la frecuencia natural, modos de vibración y relaciones de amortiguamiento que dependen de características tales como masa, rigidez y amortiguamiento.(Rao, 2012)

1.3.1 Vibraciones

Cualquier movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo se llama **vibración** u **oscilación**. El vaivén de un péndulo y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos comunes de vibración. La teoría de la vibración tiene que ver con el estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas con ellos. (Rao, 2012)

Por lo común un sistema vibratorio incluye un medio para almacenar energía potencial (resorte o elasticidad), un medio para conservar energía cinética (masa o inercia) y un medio por el cual la energía se pierde gradualmente (amortiguador).

La vibración de un sistema implica la transformación de su energía potencial en energía cinética y de ésta en energía potencial, de manera alterna. Si el sistema se amortigua, una parte de su energía se disipa en cada ciclo de vibración y se le debe reemplazar por una fuente externa para que se mantenga un estado de vibración estable.

La vibración se puede clasificar de varias maneras. Algunas de las clasificaciones importantes son las siguientes:

- **Vibración libre.** Si se deja que un sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial, la vibración resultante se conoce como vibración libre. Ninguna fuerza externa actúa en el sistema. La oscilación de un péndulo simple es un ejemplo de vibración libre.
- **Vibración forzada.** Si un sistema se somete a una fuerza externa (a menudo, una fuerza repetitiva), la vibración resultante se conoce como vibración forzada. La oscilación que aparece en máquinas como motores diésel es un ejemplo de vibración forzada.
- **Vibración no amortiguada:** Si no se pierde o disipa energía por fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración no amortiguada.

- ***Vibración amortiguada:*** Si se pierde o disipa energía por fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración amortiguada.
- ***Vibración lineal:*** Si todos los componentes básicos de un sistema vibratorio, el resorte, la masa y el amortiguador, se comportan linealmente, la vibración resultante se conoce como vibración lineal. Si la vibración es lineal el principio de superposición es válido y las técnicas matemáticas de análisis están bien desarrolladas.
- ***Vibración no lineal:*** Si cualquiera de los componentes básicos se comporta de manera no lineal, la vibración se conoce como vibración no lineal. Para vibración no lineal, el principio de superposición no es válido y las técnicas de análisis son menos conocidas. Como los sistemas vibratorios tienden a comportarse no linealmente con amplitud de oscilación creciente, es deseable un conocimiento de la vibración no lineal cuando se trate con sistemas vibratorios.
- ***Vibración determinística:*** Si el valor o magnitud de la excitación (fuerza o movimiento) que actúa en un sistema vibratorio se conoce en cualquier tiempo dado, la excitación se llama ***determinística***. La vibración resultante se conoce como ***vibración determinística***.
- ***Vibración aleatoria:*** En casos donde la excitación es ***no determinística*** o ***aleatoria***; el valor de la excitación en un momento dado no se puede pronosticar. En estos casos, una recopilación de registros de la excitación puede presentar cierta regularidad estadística. Es posible estimar promedios como los valores medios o medios al cuadrado de la excitación. Si la excitación es aleatoria, la vibración resultante se llama ***vibración aleatoria***. Ejemplos de excitaciones aleatorias son la velocidad del viento, la aspereza del camino y el movimiento de tierra durante sismos. En este caso la respuesta vibratoria del sistema también es aleatoria; se puede describir sólo en función de cantidades estadísticas.

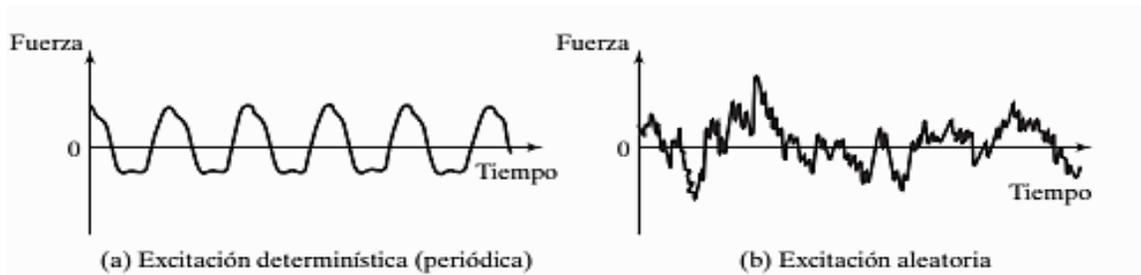


Figura 1.1 Excitaciones determinísticas y aleatorias. (Rao, 2012)

1.3.2 Frecuencia natural

Pese a la apariencia de quietud del suelo que pisamos, de los edificios, de los puentes y de muchas otras estructuras arquitectónicas que nos rodean, en realidad están en continuo cambio y movimiento, y un tipo especial del movimiento es el debido a las fuerzas mecánicas oscilantes, provocadas por la presión del aire, movimiento de vehículos o la propia interacción del hombre.

La elasticidad es la propiedad que tienen los cuerpos de deformarse bajo la acción de fuerzas externas y de recuperar su forma una vez que desaparecen estas fuerzas; dentro de ciertos rangos la deformación para todos los cuerpos es proporcional a la fuerza deformante aplicada. Por tanto, antes de alcanzar otra vez su estado de equilibrio, los cuerpos desarrollarán un cierto número de oscilaciones; y cada cuerpo, dependiendo de su forma, de su masa, del material de que esté hecho, así como de las restricciones a que esté sometido, oscilará con ciertas frecuencias propias a las que se les denomina *frecuencias naturales* (Peralta et al., 2009). Un sistema vibratorio que tiene n grados de libertad, tendrá n frecuencias naturales de vibración distintas.

En sistemas mecánicos de un grado de libertad, es la frecuencia del movimiento armónico que resulta al introducir un desplazamiento y/o una velocidad inicial a un sistema de un grado de libertad, que está en posición de equilibrio, y dejarlo vibrar libremente sin amortiguamiento (problema de vibraciones libres no amortiguadas). Su valor es:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s)} \quad \dots (1.1)$$

Donde:

k: rigidez

m: masa

En sistemas con N grados de libertad, cada modo natural de vibración (vector propio) tendrá una frecuencia natural (valor propio) asociada que será la del movimiento armónico resultante al desplazar los nudos del sistema respecto de su posición de equilibrio estático en la forma del modo natural correspondiente. Su valor es:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (Hz)} \quad \dots (1.2)$$

En cualquier caso, la o las frecuencias naturales constituyen un parámetro modal intrínseco al sistema y sólo dependerán de la rigidez e inercia del sistema (y de su distribución por el sistema en el caso del N grados de libertad), pero no del tiempo ni de las condiciones iniciales. Sean cuales sean estas condiciones iniciales, el sistema siempre tendrá la misma o mismas frecuencias.

1.3.3 Resonancia

En un mundo sometido continuamente a fuerzas oscilantes, y además rodeado de estructuras elásticas tales como puentes, edificios, etc. Es posible que en muchos casos la frecuencia de las fuerzas oscilantes, provocadas por la presión del aire, movimiento de vehículos o la propia

interacción del hombre, coincida con alguna de las frecuencias naturales de las estructuras elásticas provocando fenómenos de resonancia.(Peralta et al., 2009)

Para frecuencias de excitación próximas a alguna frecuencia natural, la amplitud del desplazamiento resultante puede ser varias veces el desplazamiento estático que se obtendría aplicando estáticamente una fuerza de la misma amplitud, produciendo que el sistema sufra oscilaciones peligrosamente grandes. Las fallas de estructuras como edificios y puentes se han asociado a la ocurrencia de este fenómeno.

Un antecedente es el colapso del puente Tacoma Narrows, que estaba situado en la ciudad de Tacoma, cerca de Washington, se trataba de un puente colgante o suspendido. El puente colapsó debido a las vibraciones inducidas por el viento en el año 1940, pocos meses después de su construcción, y a través de un modo de vibración no observado anteriormente.

1.3.4 Cargas dinámicas

Son cargas que se aplican en un período relativamente corto de tiempo que, a diferencia de las cargas estáticas, originan modificaciones en la magnitud de las tensiones y las deformaciones.

Las cargas dinámicas producidas por el impacto de un cuerpo en movimiento pueden originar efectos vibratorios. Si esta carga se repite de forma periódica y la frecuencia coincide con el período de vibración del elemento, este puede entrar en resonancia, originando deformaciones tan grandes que pueden conducir al colapso de la estructura.

- *Cargas armónicas.*

El movimiento circular de una masa rotacional M produce una fuerza centrífuga F , actuando en un plano perpendicular al eje del movimiento. Esta fuerza incrementa con el incremento de la velocidad de la masa rotacional.

Se define como una carga que varía en una función seno o coseno.

Función seno: $f(t) = F \operatorname{sen}\omega t$ (1.3)

Función coseno: $f(t) = F \operatorname{cos}\omega t$ (1.3)

Los ejemplos de movimiento armónico incluyen la vibración producida por una máquina rotativa desequilibrada, las oscilaciones de una chimenea alta debido al vórtice derramando en un viento constante, y el movimiento vertical de un automóvil en una superficie irregular de la carretera.

- ***Cargas móviles.***

Las cargas móviles son cargas que se aplican en una estructura y que generalmente viene acompañada de cambios rápidos tanto de intensidad como de posición. De modo que, durante su acción, están generando un movimiento considerable (inercial). Las cargas móviles originan modificaciones tanto en la magnitud de las tensiones como en las deformaciones que ocurren, lo que puede afectar directamente la forma y límites de rotura en las estructuras.

Las cargas móviles pueden clasificarse según la forma de movimiento:

Móviles: Son aquellas cargas cuya dirección del movimiento es perpendicular a la dirección en la que se produce la carga. Tal es el caso como en el desplazamiento de un vehículo, la forma en la que un tren se desplaza sobre rieles, entre otros.

De impacto: Son aquellas en las que la dirección del movimiento coincide con las de la dirección en la que se origina la carga. Están caracterizadas por un tiempo de acción bastante corto, casi instantáneo.

- ***Cargas periódicas.***

Las cargas periódicas son aquellas que provocan fuerzas de oscilación constante a lo largo del tiempo en las estructuras, usualmente junto con una fuerza rotacional.

Ejemplo de ello son los motores que mediante movimientos internos son capaces de introducir esfuerzos periódicos a las estructuras.

- ***Cargas aleatorias.***

Son cargas caracterizadas por una muy corta duración. Son inducidas de manera aleatoria o por prescritos intervalos. También conocidas como no deterministas son aquellas en las cuales no se conoce con exactitud su valor de fuerza excitatriz, aunque se dispone de información probabilística sobre los mismos. (Sircovich-Saar, 2006)

1.4 Cargas en puentes de carretera

Un puente es una estructura que tiene por objetivo salvar una luz para servir de enlace entre dos puntos. Por su uso se pueden clasificar en puentes de vehiculares, de ferrocarril, peatonales y tecnológicos; todos de gran importancia para el desarrollo de la economía y la sociedad.

Las estructuras de puentes de carreteras son diseñadas para soportar el tráfico durante su vida de servicio. Las cargas en puentes son acciones en forma de fuerzas, deformaciones o aceleraciones aplicadas a la estructura o a sus componentes. Las cargas actuantes en las estructuras de puentes son generalmente divididas dentro de dos categorías: (1) aquellas que actúan sobre la superestructura, y (2) aquellas que actúan sobre la subestructura. Los mayores componentes de carga de los puentes de carretera son la carga muerta, carga viva (estática y dinámica), cargas ambientales (temperatura, viento, y sismos), y otras cargas (colisión, frenado de emergencia). (Lin and Yoda, 2017)

La clasificación de las cargas puede variar de acuerdo a las especificaciones de diseño, pero pueden ser divididas fundamentalmente en cargas predominantes (primarias) y cargas subordinadas (secundarias). Las cargas aplicadas en estructuras de puentes pueden además ser clasificadas como cargas estáticas y cargas dinámicas, como también en cargas concentradas y cargas distribuidas etc.

Tomando como ejemplo las cargas de diseño de Japón, cuatro sistemas de cargas fueron divididos de acuerdo a las *Especificaciones Estándar de Puentes de Autopistas de la Asociación de Carreteras de Japón* (Standard Specification of Highway Bridges of Japan Road Association). Ellas son:

1. Cargas principales (P) – carga muerta (D), carga viva (L), carga de impacto (I), fuerza de pretensado (PS), fluencia del hormigón (CR), contracción por secado (SH), presión de la tierra (E), presión hidráulica (HP), y flotabilidad o levantamiento (U).
2. Cargas subordinadas (S) – carga de viento (W), cambio de temperatura (T), y terremoto o sismo (Normalización).
3. Cargas especiales correspondientes a las cargas principales (PP) – carga de nieve (SW), influencia del desplazamiento del terreno (GD), influencia del desplazamiento de apoyos (SD), presión de las olas (WP), y fuerza centrífuga (CF).
4. Cargas especiales correspondientes a las cargas subordinadas (PA) – fuerza de frenado (BK), carga de erección (ER), fuerza de colisión (CO), otras.

De acuerdo con la locación y el tipo de puente, las cargas anteriormente mencionadas deben ser seleccionadas apropiadamente durante el diseño y análisis estructural, pero no necesariamente se consideran todas las cargas. Las principales cargas consideradas en el análisis del puente se analizan a continuación. (Lin and Yoda, 2017)

1.4.1 Carga de viento

Las cargas de viento son producidas por el flujo de aire alrededor de las estructuras. En el diseño de puentes, es definida como la presión del viento sobre el puente. Las magnitudes varían con la velocidad del viento, tipo de terreno etc. Para puentes de grandes luces, especialmente los colgantes y suspendidos, la carga de viento es muy importante en su diseño

y muy seguido desempeña un papel crítico afectando la solidez, rigidez y estabilidad de los puentes. (Lin and Yoda, 2017)

Se supondrá, salvo condiciones excepcionales, que el viento actúa horizontalmente y en cualquier dirección. De estas direcciones se considerará fundamentalmente el efecto del viento, según las direcciones principales de la estructura. (Normalización, 2003)

El esfuerzo del viento se representará en la estructura como una presión (KN/m^2). Para su obtención es necesario a partir de la velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10 m sobre el terreno, determinar una presión básica.

Se puede determinar la carga unitaria característica total, una vez hallada la presión básica, multiplicando por el coeficiente de recurrencia (C_t), de topografía o sitio (Peralta et al.), de altura (C_h), de ráfaga (Toro et al.), de reducción (C_{ra}) y de forma o aerodinámico (C_f).

Todos estos coeficientes se encuentran tabulados y correctamente explicados en la NC 285:2003 de tal forma que se pueda determinar correctamente el efecto del viento sobre las construcciones.

1.4.2 Carga sísmica

Los sismos son fenómenos naturales que ocurren en el interior de la Tierra cuando se libera energía provocando el rompimiento repentino de la corteza terrestre. La mayoría de estos están vinculados a efectos tectónicos los cuales se manifiestan en la superficie en forma de movimientos mecánicos como es el caso de las fallas.

La carga sísmica es uno de los conceptos básicos de la ingeniería de terremotos, el cual se basa en la aplicación de una oscilación sísmica a una estructura. Esto sucede al contacto de la superficie de una estructura cualquiera con el suelo o con estructuras adyacentes. La carga sísmica depende, primariamente del riesgo sísmico, parámetros geotécnicos del sitio y la frecuencia natural de las estructuras. Hay componentes vertical y horizontal del movimiento del suelo en los terremotos, pero el horizontal es la principal causa de daños en puentes. Es

por ello que solamente el movimiento horizontal del suelo en terremotos es considerado en el diseño y análisis de puentes. (Lin and Yoda, 2017)

Los sismos se pueden clasificar en mínimos, básicos, severos, y extremos, estos poseen relación con la clasificación respecto a la categoría ocupacional de obras, en dependencia de la importancia de obra será el diseño a realizar.

Tabla 1.1 Tipos de sismos.(Normalización, 2017)

Sismo	Probabilidad de ser excedido en un período de 50 años de vida útil	Empleo
Básico	10% (475 años)	Obras Ordinarias
Severo	5% (808 años)	Obras Importantes y Esenciales
Extremo	3% (1642 años)	Obras críticas
Mínimo	20% (25 años)	En casos de excepción indicados en la norma que incluyen las obras utilitarias y algunos casos de readecuación sísmica de obras existentes. Es una reducción del sismo básico.

Las obras esenciales son las que deben permanecer operativas durante y después de un desastre o evento. No deben sufrir daños estructurales o de otro tipo que las hagan inoperables o pongan en riesgo a gran cantidad de personas con la ocurrencia de un sismo severo o extremo. Dentro de este grupo se encuentran los puentes.

En Cuba se han detectado sismos a lo largo y ancho de todo el territorio, mayormente en la zona oriental, es por esto que la NC 46:2017 propone un mapa de sismicidad con 5 zonas definidas.

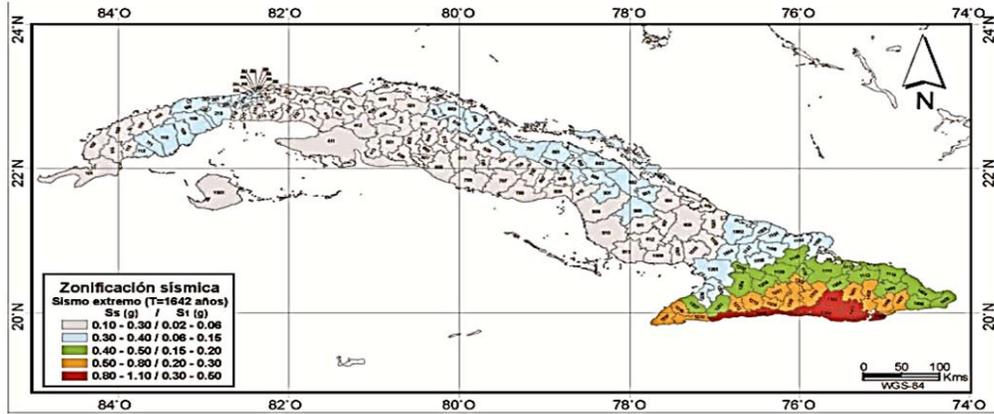


Figura 1.2 Zonificación sísmica en Cuba. (Normalización, 2017)

Según la NC: 46-2017 donde se reflejan las características de los diferentes municipios de la provincia de Matanzas, todos se encuentran en la zona 1y por tanto no se aplicará diseño sísmo resistente para ninguna de las obras ubicadas en ella.

Tabla 1.2 Peligro sísmico en las diferentes zonas del territorio de Matanzas. (Normalización, 2017)

Provincia	Municipio	Cód. Munic.	S0(g)	Ss(g)	S1(g)	TL(s)	Zona
Matanzas	Matanzas	401	0,142	0,246	0,045	3,0	1
Matanzas	Cárdenas	402	0,136	0,245	0,046	3,0	1
Matanzas	Varadero	403	0,145	0,246	0,042	3,0	1
Matanzas	Martí	404	0,136	0,244	0,043	3,0	1
Matanzas	Colón	405	0,127	0,234	0,044	3,0	1
Matanzas	Perico	406	0,125	0,234	0,047	3,0	1
Matanzas	Jovellanos	407	0,150	0,276	0,053	3,0	1
Matanzas	Pedro	408	0,158	0,293	0,053	3,0	1
Matanzas	Limonar	409	0,147	0,264	0,045	3,0	1
Matanzas	Unión de	410	0,128	0,240	0,047	3,0	1

Matanzas	Ciénaga de	411	0,097	0,210	0,041	3,0	1
Matanzas	Jagüey	412	0,160	0,292	0,050	3,0	1
Matanzas	Calimete	413	0,140	0,256	0,047	3,0	1
Matanzas	Los Arabos	414	0,130	0,238	0,039	3,0	1

1.4.3 Carga de vehículos

La carga viva en el diseño de puentes generalmente se refiere a cargas debido a vehículos en movimiento que son dinámicos, o las cargas que cambian sus posiciones con respecto al tiempo. Esto es diferente en estructuras de edificios donde las cargas vivas son las de ocupación, las cuales son consideradas como estáticas. (Lin and Yoda, 2017)

Para puentes de carretera, la carga viva incluye la carga vehicular. Generalmente varía de acuerdo a la locación del puente y las condiciones de tráfico de los vehículos inusualmente grandes. (Lin and Yoda, 2017)

Para los puentes de autopistas, carreteras y urbanos el diseño se deberá realizar con el vehículo *MS-32* y con el vehículo *NK-80* de acuerdo a las disposiciones establecidas. (Normalización, 2009)

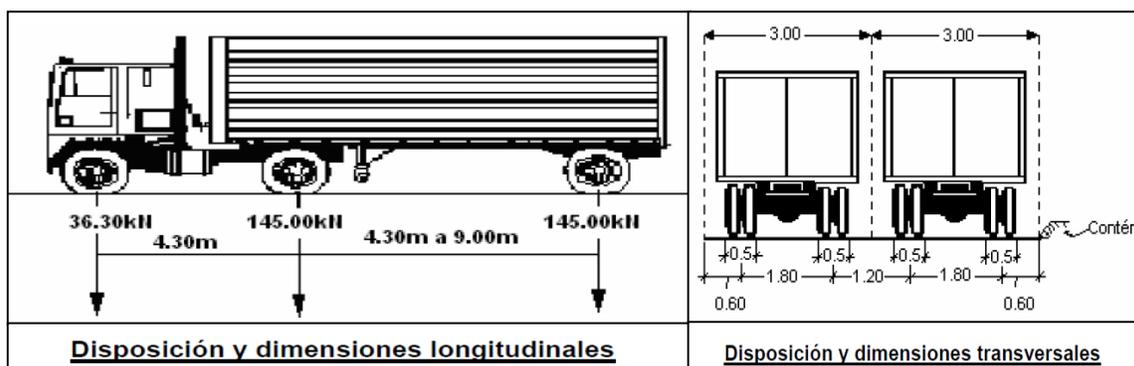


Figura 1.3 Disposición y dimensiones longitudinales y transversales del vehículo de diseño *MS-32*. (Normalización, 2009)



Figura 1.4 Esquema de las cargas distribuidas y concentradas para el vehículo normativo MS-32. (Normalización, 2009)

La carga **MS-32** se permite considerarla como un solo camión tipo en el tramo analizado o una carga de carril o carga distribuida sustitutiva que incluye una carga concentrada para el cálculo de momento y una concentrada para el cálculo de cortante.

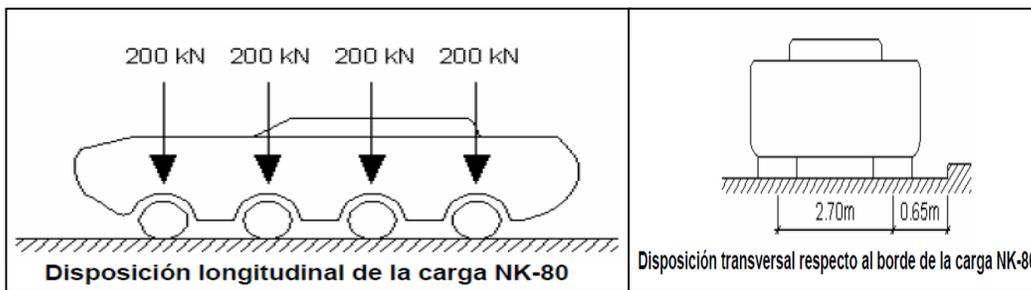


Figura 1.5 Disposición longitudinal y transversal del vehículo de diseño NK-80. (Normalización, 2009)

1.5 Método de elementos finitos (MEF)

El modelado de distintos procesos físicos, cuya correcta comprensión, predicción y control son importantes para las ciencias y la ingeniería, se hace a través de ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Entre tales procesos se pueden citar: los problemas de la mecánica de fluidos, reacciones químicas, deformación de los cuerpos sólidos y campos electromagnéticos. En la mayoría de los casos, la solución exacta de estos modelos es desconocida y a veces ni siquiera se sabe si existe una solución única. Por estas razones, en general, la única manera de resolver las EDP que se plantean en estos modelos es recurriendo a métodos numéricos para definir una solución aproximada. Hoy en día, los métodos

numéricos para EDP constituyen una parte indivisible de la ciencia y la ingeniería moderna. Resulta común, debido a su potencial y versatilidad, que el método de elementos finitos (MEF) sea frecuentemente el más utilizado para obtener una solución aproximada a cualquiera de estos problemas.(Calderón and Gallo, 2011)

1.5.1 Método de Galerkin

La idea básica detrás del método de Galerkin es muy simple. El método de Galerkin, que se publicó por primera vez en 1915, se basa en una sucesión de subespacios de dimensión finita $\{V_n\}_{n=1}^{\infty} \subset V$, que converge a V . Tal que:

$$\bigcup_{i=1}^{\infty} V_i = V \quad \dots (1.4)$$

Donde $V_n \subset V_{n+1} \subset V$, y $\dim(V_n) = N_n < \infty$ para todo $n = 1; 2; \dots$

Cada subespacio V_n es generado seleccionando un conjunto de funciones linealmente independientes $\{\phi_i\}_{i=1}^{N_n}$ en V y representa al mismo tiempo un espacio de Hilbert (Hilbert es cerrado).

Teniendo definido el espacio V_n , se plantea el problema sobre V_n en lugar de V . Esto es, se busca una función $u_n \in V_n$ que satisfaga:

$$B(u_n; u) = l(u) \quad \forall u \in V_n \quad \dots (1.5)$$

Este problema normalmente se denomina *problema discreto o aproximación de Galerkin*. Bajo hipótesis apropiadas la sucesión de soluciones $(u_n)_{n=1}^{\infty}$, $u_n \in V$, calculadas exactamente, converge a la solución exacta del problema.(Calderón and Gallo, 2011)

1.5.2 La malla de elementos finitos

En situaciones prácticas, la determinación de funciones bases apropiadas para usar en el método de Galerkin puede ser extremadamente difícil, especialmente en casos donde el

dominio Ω no tiene una forma simple. El MEF supera esta dificultad proporcionando una manera sistemática para generar funciones bases en dominios con una forma bastante arbitraria. Lo que hace al método especialmente atractivo es el hecho que estas funciones bases son polinomios a trozos que son diferentes de cero solo en una parte relativamente pequeña de Ω .(Calderón and Gallo, 2011)

El método consiste en comenzar subdividiendo el dominio Ω en un número finito E de subdominios $\Omega_1; \Omega_2; \dots \Omega_E$, llamados los elementos finitos. Estos elementos no se solapan y cubren Ω , por tanto, satisfacen:

$$\Omega_l \cap \Omega_j = \emptyset \quad \text{para} \quad l \neq j,$$

$$\bigcup_{e=1}^E \overline{\Omega_e} = \overline{\Omega} \quad \dots (1.6)$$

Para evitar complicaciones innecesarias, se asume que el dominio Ω es poligonal si es un subconjunto de \mathbb{R}^2 . Es decir, la frontera $\partial\Omega \subset \mathbb{R}^2$ de Ω se compone de segmento rectos. Bajo estas condiciones, el dominio entero se puede cubrir exactamente por elementos poligonales, como se muestra:

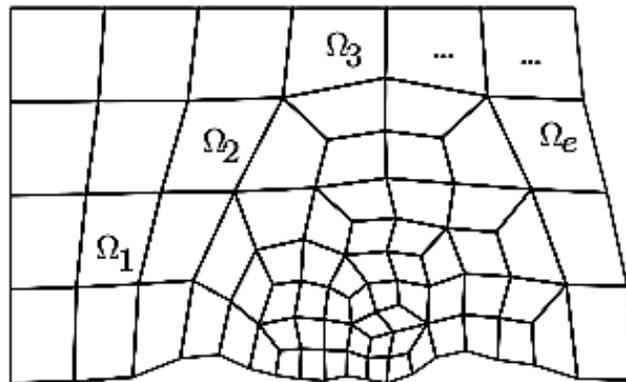


Figura 1.6 Mallado de elementos finitos. (Calderón and Gallo, 2011)

1.6 Modelación estructural

La modelación es el proceso mediante el cual se crea una idealización matemática que pretende representar una estructura lo más real posible.

En la actualidad existen diferentes programas de análisis por elementos finitos, entre los cuales están ABAQUS, ANSYS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, ALGOR, STRUDL y CAEPIPE, MARC, SAP2000, ALTAIR HYPERWORKS y BRIDGE. Estos programas contienen herramientas que permiten el modelado y la simulación de un gran número de fenómenos, estructuras y materiales, para lo cual divide su operación en etapas o módulos, donde generalmente se definen aspectos tales como geometría del modelo, tipos de elementos en los que se dividirá, asignación de propiedades de los materiales y generación de la malla para definir los nodos y uniones entre elementos. Después se asignan las condiciones a las que está sometido el modelo, tales como fuerzas, presiones, restricciones de movimiento y temperatura; y por último se realiza un análisis de los resultados obtenidos para los nodos y/o elementos y para el modelo en general, obteniéndose datos mediante tablas y gráficos. (Alfonso et al., 2015)

1.6.1 Ventajas y desventajas de la modelación computacional

Según (Möller, 2014) la modelación computacional posee ciertas ventajas y desventajas.

Ventajas:

- Suple la experimentación física y convencional, cuando ella no es factible por diversas razones.
- Permite analizar numerosos efectos al realizar diversas alteraciones.
- Permite incluir elementos de incertidumbre.
- Tiempos rápidos de respuesta

- Facilita el entrenamiento de personal y la enseñanza-aprendizaje de sistemas complejos y análisis diversos.
- Permite experimentar con situaciones nuevas y anticipar resultados

Desventajas:

- En situaciones complejas puede requerir equipo costoso y puede tardar mucho tiempo para desarrollarse
- No genera soluciones óptimas para los problemas
- No produce respuestas por sí mismo, el usuario debe generar las condiciones y restricciones.
- Es una aproximación del sistema real.
- Requiere de equipo computacional y el conocimiento de algún software de modelación y saberlo aplicar.
- Es un enfoque de ensayo y error que puede generar diferentes soluciones.

1.7 Conclusiones parciales

El análisis dinámico se realiza a estructuras sometidas a vibraciones y oscilaciones que son producidas por cargas dinámicas que a su vez generan tensiones y deformaciones en la estructura. En puentes, son las cargas móviles, uno de las principales fuerzas que provocan estos fenómenos. Es de vital importancia estudiar el fenómeno de la resonancia y sus posibles efectos, pues puede llegar a generar grandes deterioros e incluso el colapso de las estructuras si no son diseñadas y/o analizadas correctamente.

En la actualidad el uso de herramientas informáticas desarrolla un papel muy importante en el análisis y/o diseño a través de la modelación estructural, obteniendo de esta, una estimación bastante exacta de los resultados del comportamiento de las estructuras analizadas, en un corto período de tiempo y pudiendo realizar pruebas en el modelo sin tener que afectar la estructura real.

CAPÍTULO 2 MODELACIÓN DEL PUENTE DE LA CIRCUNVALACIÓN SOBRE EL RÍO SAN JUAN

En este capítulo se lleva a cabo una descripción del puente en cuanto a geometría, materiales, vínculos a tierra y entre los elementos estructurales, cargas y secciones; con el objetivo de elaborar un modelo en el software CSiBridge lo más real posible. Para lograrlo se realiza la calibración del modelo y de esta manera se logra analizar con mayor precisión su comportamiento bajo la acción de las cargas móviles.

2.1 Geometría

Ejecutado totalmente in situ, tiene una longitud de 90.80 m con una luz central de 61.0 m entre las pilas y voladizos a ambos lados de 13.0 m, con losas de transición de 1.90 m. Este puente con forma encajonada es uno de los pocos construidos con esta tipología en Cuba.

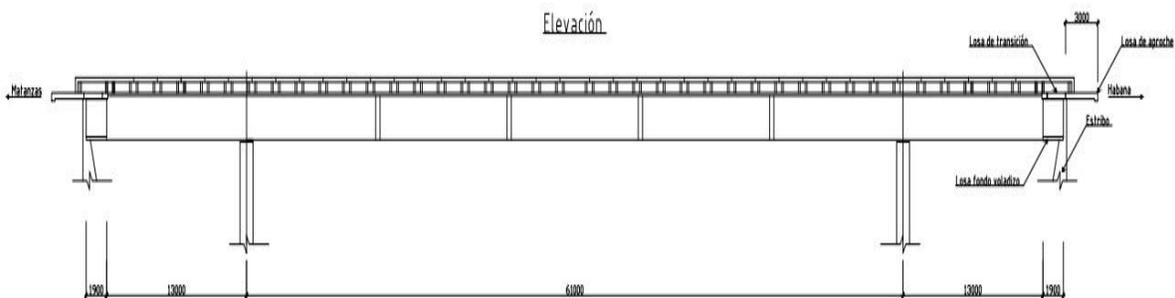


Figura 2.1 Vista longitudinal del puente. (Elaboración propia)

La sección transversal consta de una calzada de rodadura, con dos sendas de circulación de 3.50 m de ancho con pendiente de 1% y paseos a ambos lados de 3.0 m con barandas de hormigón in situ formados por pasamanos de 0.28 m de espesor y pretiles de 0.20 x 0.25 m de sección.

Tanto en el interior de los cajones como en el exterior del puente, existe sistema de iluminación para dar servicio tanto a las luminarias, como para mantenimiento en el interior. En ambos lados del puente a 15.00 m de su extremo existen registros para permitir al acceso hacia la parte de adentro de los cajones. (Toro et al., 1997).

2.2 Materiales

Se sabe por la información obtenida de los planos consultados que el hormigón utilizado en la fabricación del puente tiene una resistencia a compresión $f'_c=5000\text{psi}$ o 35MPa , mientras que las losas de transición o de aproche fueron fundidas con un hormigón de resistencia a compresión de $f'_c=3000\text{psi}$ o 21MPa . Sin embargo, no hay ninguna documentación que refleje la existencia de información del material además del plano consultado o de ensayos del mismo.

Tabla 2.1 Cubicación del cajón. (Planos EMPAI)

CUBICACIÓN PARA EL CAJÓN						
LUGAR	UNID	DIMENSIONES			VOLUMEN	
		LARGO	ANCHO	ALTO	PARCIAL	TOTAL
LOSA SUPERIOR	1	5.35	13.00	0.20	13.91	13.91
PAREDES INTERIORES EXTERIORES	2	3.10	0.25	1.95	3.02	5.44
	2		0.20		2.42	
DIAFRAGMAS	2	9.35	0.20	0.05	0.19	0.75
	2			0.15	0.56	
$f'_c=5000\text{ psi}$ (35 MPa)					TOTAL	20.10

Material Property Data

Material Name: 5000Psi

Material Type: Concrete

Symmetry Type: Isotropic

Modulus of Elasticity (E): 27789382

Weight and Mass: Weight per Unit Volume: 23.5631, Mass per Unit Volume: 2.4028

Units: KN, m, C

Poisson (U): 0.2

Coeff of Thermal Expansion (A): 9.900E-06

Other Properties For Concrete Materials: Specified Concrete Compressive Strength, f_c : 34473.79, Expected Concrete Compressive Strength: 34473.79

Lightweight Concrete

Shear Strength Reduction Factor: [Empty]

Advanced Material Property Data: Nonlinear Material Data..., Material Damping Properties..., Time Dependent Properties..., Thermal Properties...

OK, Cancel

Figura 2.2 Propiedades del hormigón $f_c=5000$ psi. (CSiBridge)

2.3 Secciones

La sección transversal del tablero en la luz central está constituida por una estructura conformada por un gran cajón seccionado en tres partes de un ancho total de 11.60 m y un peralte de 2.25 m. A partir de los cajones se construyeron voladizos de 0.70 m a ambos lados para un ancho total de 13.0 m.

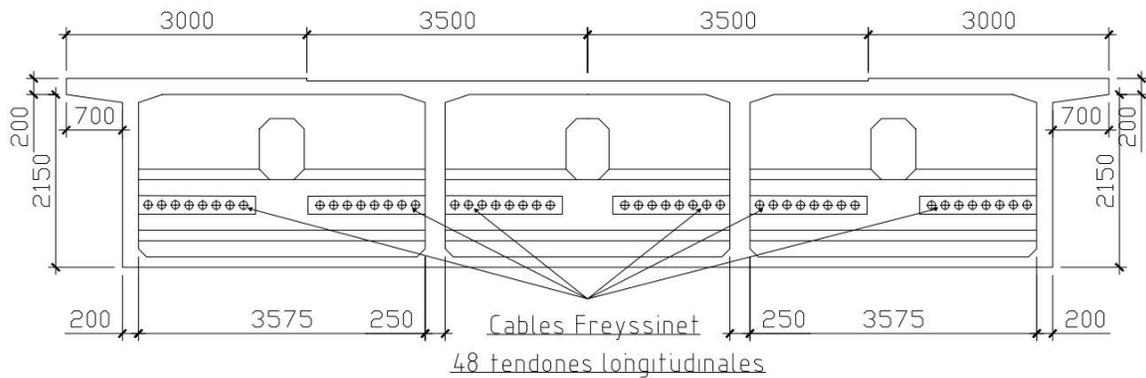


Figura 2.3 Vista transversal del cajón con los diafragmas. (Elaboración propia)

Las paredes interiores del cajón tienen un espesor de 0.25 m y las exteriores de 0.20 m y en la sección longitudinal se ubican tres diafragmas de 0.20 m de espesor espaciados a 12.20 m entre ellos. En estos están localizadas las monturas metálicas que permiten y dirigen el paso de los cables de pretensados. (Toro et al., 1997)

La sección transversal de las luces extremas (voladizos) está constituida por una estructura de hormigón macizo con un peralto que varía de 2.25 m en el apoyo, a 1.98 m en el extremo del voladizo. Mientras que las losas superior e inferior de aproche conforman un cajón de 1.98 m con sus paredes laterales de 0.10 m.

2.4 Vínculos

Las pilas están formadas por muros semi-masivos de 1.05 m de ancho en la parte superior y tienen forma rectangular distribuidas a todo lo largo de la sección transversal del puente. Estas pilas descansan sobre pilotes de hormigón prefabricado de 0.40 x 0.40 m de sección y de longitud variable, hincados hasta el estrato de roca. Los aparatos de apoyo en una de las pilas son articulaciones (3 articulaciones) móviles sobre acero (material plástico) y en la otra son apoyos de hormigón armado (fijo).

Los estribos también son construidos semi-masivos sobre pilotes de hormigón prefabricados, hincados hasta la roca. En el estribo descansa sobre el muro la losa de fondo del voladizo y

en el respaldo la losa de transición. También aquí, y en el ancho correspondiente a las sendas de circulación, descansa la losa de aproche que tiene una longitud de 3.0 m y 0.20 m de espesor. (Toro et al., 1997)



Figura 2.4 Vista de los apoyos articulados. (Tomada por el autor)

2.5 Postesado

Actualmente el sistema de postesado exterior cuenta con 89 cables partidos de los 1728 totales que conforman 48 tendones. En el interior de los cajones están contenidos de forma aérea los tendones, en grupos de 16 para cada cajón. Cada uno de ellos está formado por 36 cables de Freyssinet 7 mm de diámetro, al llegar al voladizo estos se dividen en dos grupos de 8 tendones, que salen a 0.64 m del borde superior y a 0.40 m del borde inferior del mismo. Los tendones en la zona del voladizo se colocan en el interior de unos tubos de fibrocemento de diámetro de 150 mm sin relleno de mortero de adherencia. (Toro et al., 1997)

Cada tendón presenta una reserva de aproximadamente de 132.12 toneladas de fuerza en estado óptimo, la cual en estos momentos varía de uno a otro teniendo en cuenta sus pérdidas particulares.

2.6 Modelo del puente

Para que un modelo se considere correctamente elaborado es necesario que posea las mismas características que la estructura real, de tal manera que su comportamiento llegue a ser prácticamente el mismo. Para lograrlo, en este caso, se comparan las medidas reflejadas en planos y las reales de la estructura, así como los materiales reales en su estado actual con los de diseño considerados inicialmente, para así construir un modelo lo más exacto posible que refleje las condiciones actuales de la estructura y sus deformaciones utilizando el software CSiBridge.

En la geometría de la estructura, se utilizaron las medidas obtenidas de los planos e informes de la EMPAI, para cada uno de los 2 tipos de secciones presentes: voladizos macizos y luz central; los cuales abarcan una longitud total de 87 m. Estos se configuraron independientemente en el software y luego fueron integrados como una estructura continua. Los voladizos tienen su extremo exterior libre. Elementos del tipo frame se utilizaron para conformar las pilas de acuerdo a las características reflejadas en informe “Reparación Puente sobre Río San Juan, Circunvalación Matanzas”, y en su base uniones fijas por su condición de empotramiento con los pilotes prefabricados hincados hasta el estrato resistente, descritos en los planos consultados.

No se tuvieron en cuenta las losas de apoye que están simplemente apoyadas sobre los voladizos, pues al ser discontinuas con el resto de la estructura del puente no provocan variación alguna en su comportamiento.

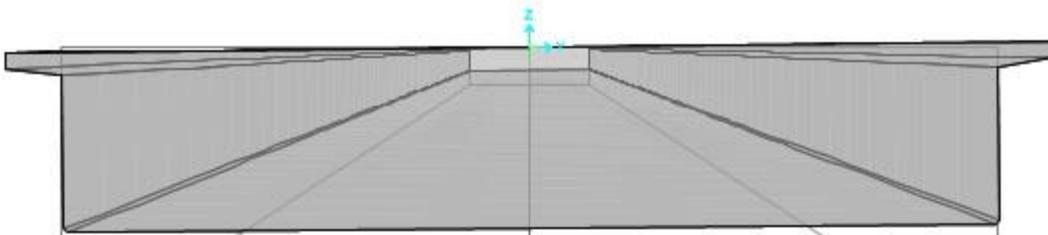


Figura 2.5 Sección transversal de los voladizos. (CSiBridge)

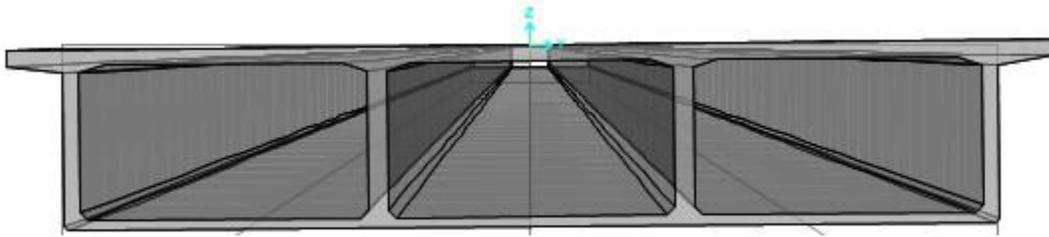


Figura 2.6 Sección transversal de la luz central. (CSiBridge)

En la vista longitudinal existe un cambio en la profundidad de las secciones en voladizo donde varía desde 2.25 m en su extremo interior posicionado sobre la pila donde conecta con la luz central, hasta 1.98 m en el extremo exterior.

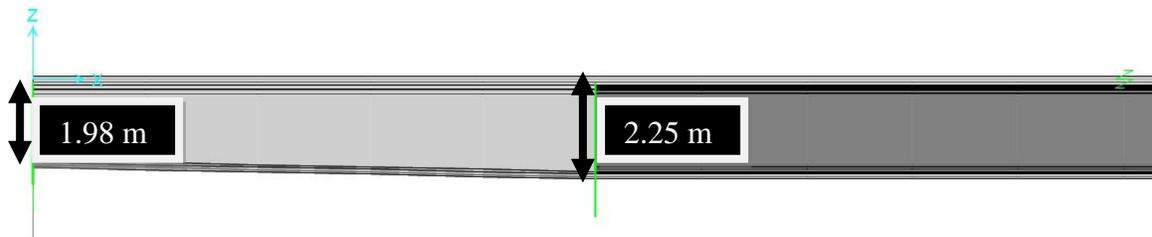


Figura 2.7 Variación paramétrica en los voladizos del puente. (Elaboración propia)

Para los aparatos de apoyo en lugar de ser establecidos por sus propiedades, fueron dispuestos según su forma de trabajo, en una de las pilas son articulaciones (3 articulaciones) móviles sobre acero (material plástico) y en la otra son apoyos (3 apoyos) de hormigón armado (fijo).

El hormigón utilizado en la modelación del puente tiene una resistencia a compresión $f'_c=5000\text{psi}$ o 35MPa para la sección transversal de la luz central y los voladizos, las pilas y

los diafragmas, configurado para este último con un factor de reducción de escala de 0.95 que se consideró a partir de la pérdida de resistencia por los años de servicio, el interperismo y las lesiones observadas como pérdidas de sección y grietas.

Por otra parte, los tendones correspondientes al sistema postesado del puente se reflejaron con su área total tal y como debiera ser con los 36 cables de Freyssinet que lo forman, el cambio ocurre en la designación de la fuerza por tendón. Para cada cable la reserva de fuerza es de 3.67 toneladas, por ello se especificó cada tendón por separado y con la información recogida se le restó a cada uno sus pérdidas particulares. Se modelaron como elementos de la estructura y carga de tipo fuerza.



Figura 2.8 Vista longitudinal en planta de los tendones. (CSiBridge)

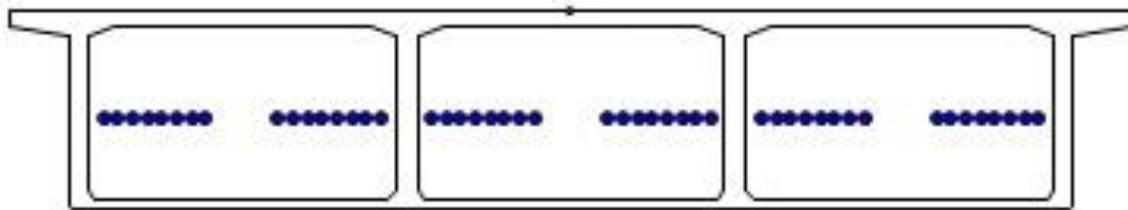


Figura 2.9 Vista transversal de los tendones en la sección del cajón. (CSiBridge)

2.7 Estados de cargas

Para la elaboración del modelo se tuvieron en cuenta 3 esquemas de carga para la determinación de los desplazamientos verticales en el Estado Límite de Utilización y 3 esquemas de carga para la determinación de las tensiones en el Estado Límite Último, cada uno de ellos con cargas permanentes en combinación con la carga de viento y las cargas tipo móvil, conformadas por los vehículos de diseño MS-32 y NK-80 de la NC 733:2009.

En las cargas permanentes se tuvo en cuenta el peso propio de las secciones, los pretiles, el pavimento y el pretensado. Para cada uno de ellos hay establecido un valor de ponderación, que solamente se tiene cuenta en el Estado Límite Último.

*Tabla 2.2 Valores del factor de ponderación de las solicitaciones de carácter permanente.
(Normalización, 2009)*

Tipo de acción	Valor máximo	Valor mínimo
Peso propio de elementos de hormigón pretensado	1.25	0.90
Peso de pavimentos de calzada y aceras	1.50	0.90
Peso de piezas de pretil	1.50	0.90
Peso propio de elementos metálicos	1.10	0.90

Los vehículos fueron configurados con a una velocidad constante de 1m\s en un solo sentido de circulación, el MS-32 con un vehículo por cada uno de los dos carriles de circulación y el NK-80 con un vehículo en el centro de la vía.

Para la carga de viento se tomó como valor de ponderación 1.20, ofrecido por la NC 733:2009 en la tabla de combinaciones para el Estado Límite Último del vehículo MS-32. No se considera el viento extremo en ninguna de las combinaciones propuestas

Las combinaciones usadas tanto en el Estado Límite de Utilización como en el Estado Límite Último fueron las siguientes:

- cargas permanentes y vehículo MS-32,
- cargas permanentes, carga de viento y vehículo MS-32,
- cargas permanentes y vehículo NK-80.

2.8 Validación del modelo

Luego de la realización del modelo se ejecutó un análisis del mismo para observar los desplazamientos y deformaciones que pudieran ocurrir, observándose en el comportamiento de la estructura una deformación inicial en el sentido positivo del eje 'z' en la luz central producto de la flexión generada por la entrada al puente de la carga vehicular, que a medida que avanza por la sección en voladizo va disminuyendo hasta que alcanza la sección central donde ocurre nuevamente un pandeo, pero en sentido contrario. En este caso particular se ubicaron dos vehículos MS-32, uno por carril con diferente sentido de circulación. De esta forma se pudo comprobar si la forma de trabajo del puente era correcta.

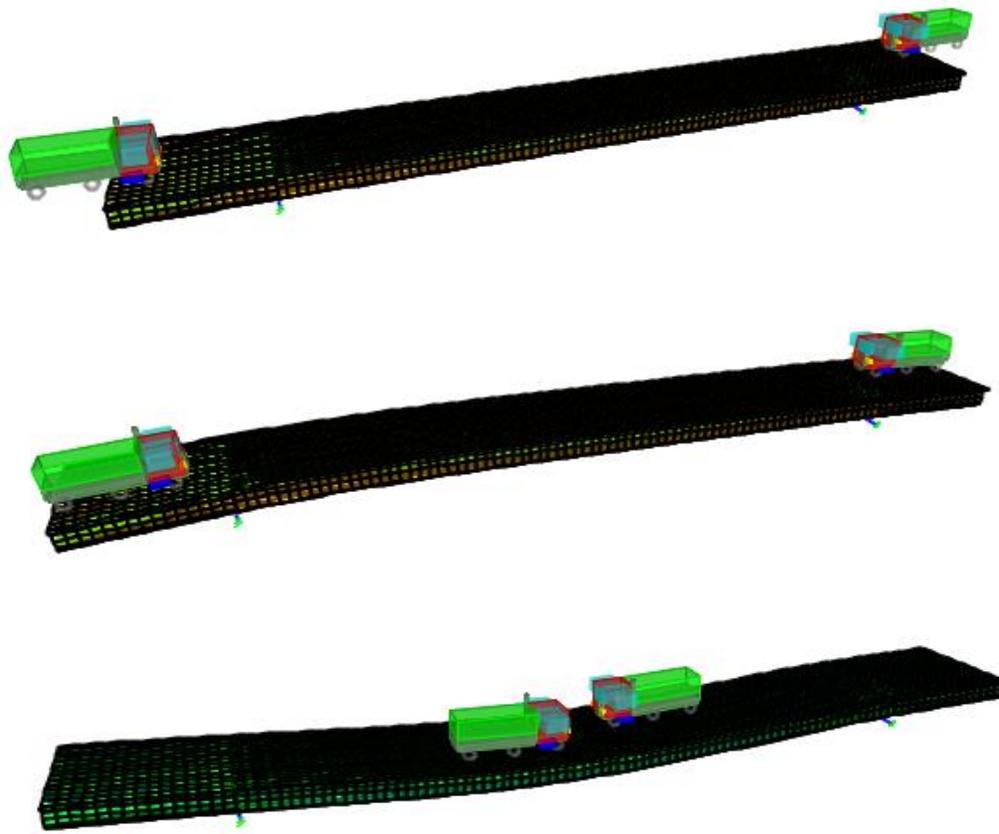


Figura 2.10 Diagrama de interacción del vehículo MS-32 en el puente. (CSiBridge)

El desplazamiento vertical (flecha) de la sección longitudinal del puente en su luz central, obtenidos por la interacción de la carga del vehículo MS-32 y las cargas permanentes con la estructura, fue comparado con la flecha máxima permisible en la superestructura para la componente vertical de la carga accidental móvil característica reflejado en la NC 733:2009.

Tabla 2.3 Flechas máximas permisibles en la superestructura para la componente vertical de la carga accidental móvil característica. (Normalización, 2009)

Tipo de estructura		Puentes de autopistas	Puentes Categoría I--II	Puentes Categoría III--IV
Puentes Isostáticos	Tramo simple	$\lambda/350$	$\lambda/300$	$\lambda/250$
	Tramo múltiple	$\lambda/400$	$\lambda/350$	$\lambda/300$
Puentes hiperestáticos		$\lambda/350$	$\lambda/300$	$\lambda/250$
Voladizos		$\lambda/250$	$\lambda/250$	$\lambda/200$
Armaduras		$\lambda/600$	$\lambda/600$	$\lambda/600$
Arcos		$\lambda/1000$	$\lambda/800$	$\lambda/600$

NOTA 1: λ : Luz de cálculo del tramo o del voladizo:
NOTA 2: Para el caso de voladizo se considera la longitud de este
NOTA 3: Para el caso de los arcos la luz proyectada
NOTA 4: En los puentes de carretera y urbanos de madera, los valores permisibles de la flecha para la carga excepcional, podrá aumentarse en un 20%
NOTA 5: En el caso de superestructuras construidas con armaduras de madera se deberá asumir una flecha permisible de $\lambda/300$

Por la importancia económica y vial de la estructura, así como sus condiciones de apoyo, se trata como puente hiperestático de autopista, por lo cual su flecha máxima permisible será de 174 mm. La flecha máxima obtenida del modelo de la interacción del vehículo MS-32 en el puente con las cargas permanentes es de 20.2264 mm que es mucho menor que la permisible, con lo que se puede afirmar que el comportamiento del puente es correcto y por tanto lo es la modelación.

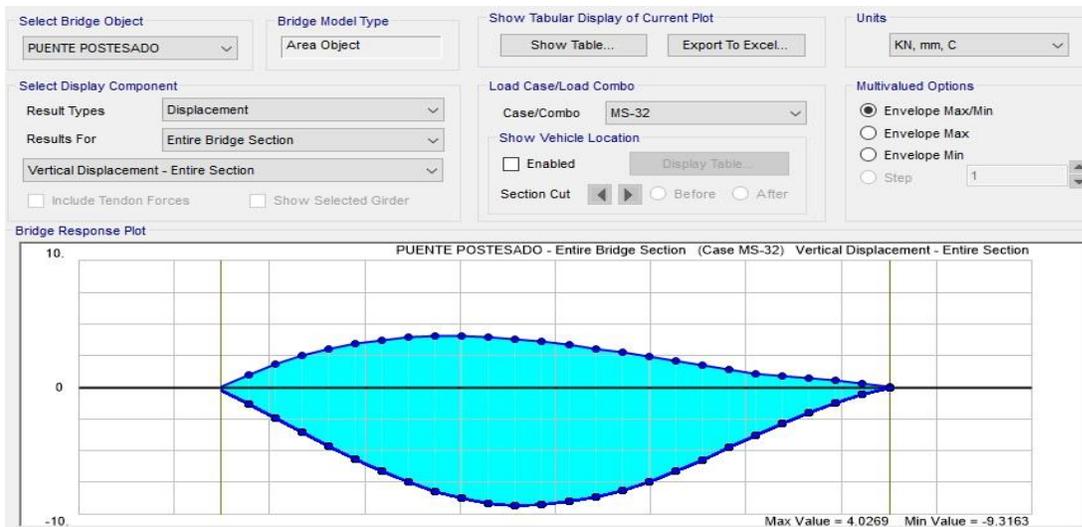


Figura 2.11 Desplazamiento vertical producido por el vehículo MS-32 en el puente. (CSiBridge)

2.9 Calibración de la malla

Para la calibración del mallado se realizaron una serie de medidas de las tensiones producidas en el puente por las cargas permanentes, para lo cual se definieron tres puntos aleatorios en la estructura. Las medidas se hicieron para diferentes tamaños de mallados que son: 2 m, 1.5 m, 1 m, 0.5m, 0.4 m, 0.3 m y 0.25 m.

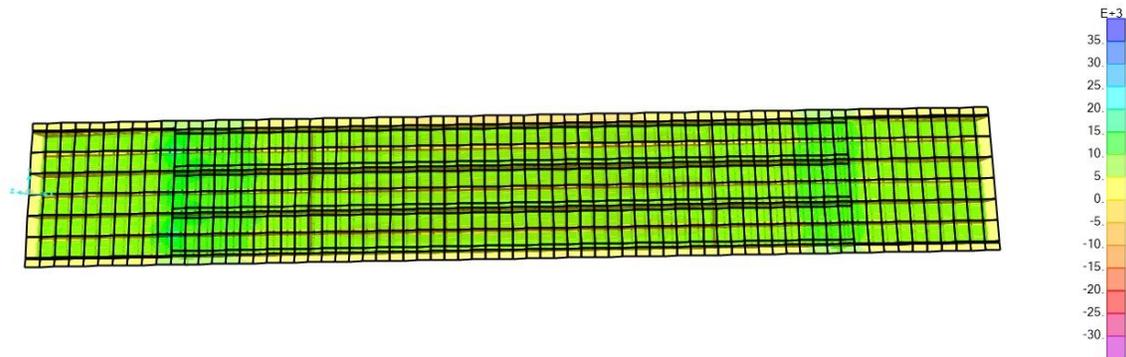


Figura 2.13 Mallado de 2 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

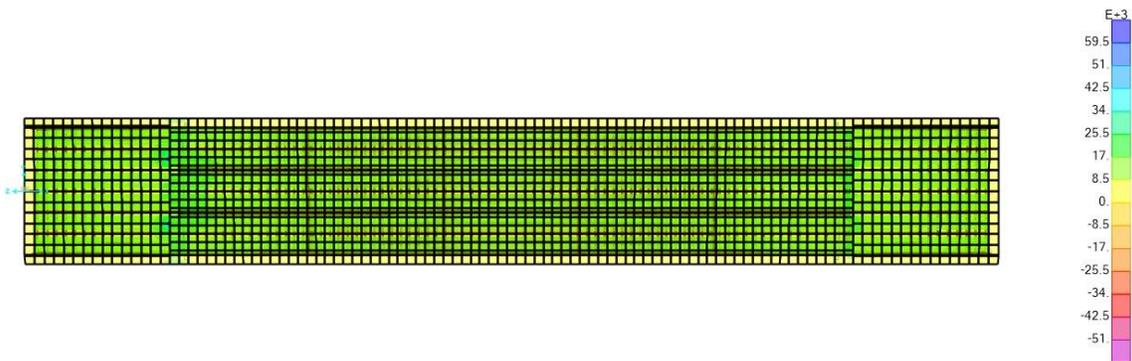


Figura 2.14 Mallado de 1.5 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

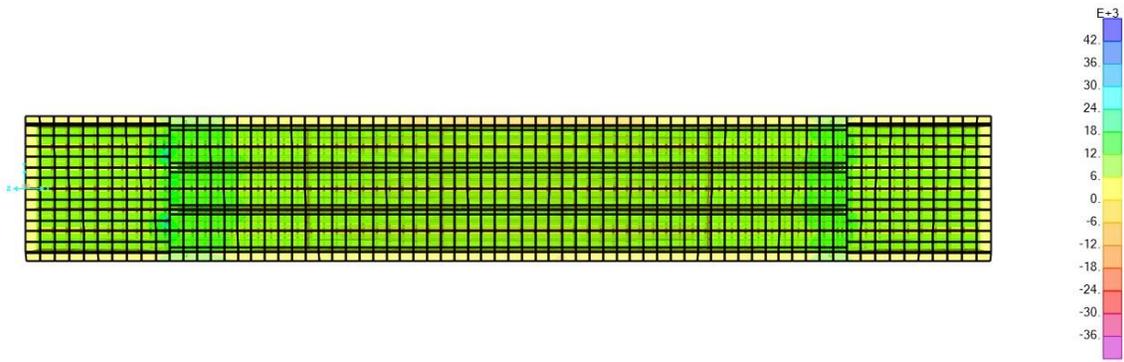


Figura 2.15 Mallado de 1 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

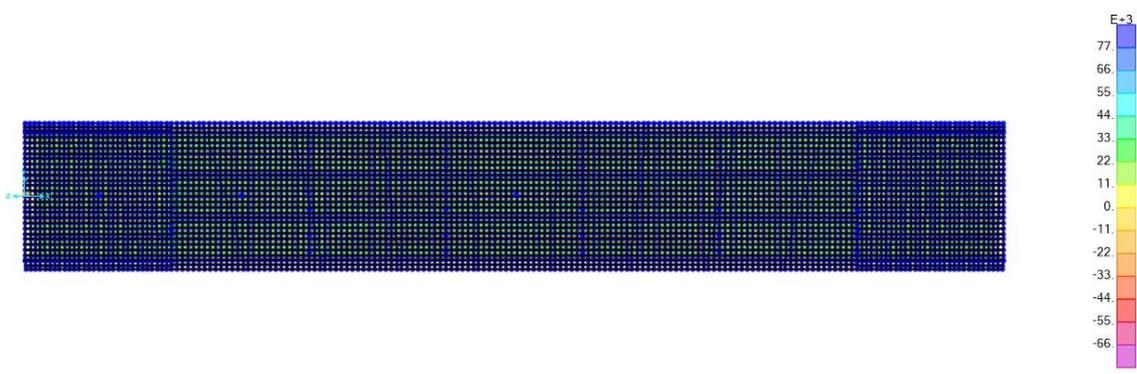


Figura 2.16 Mallado de 0.5 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

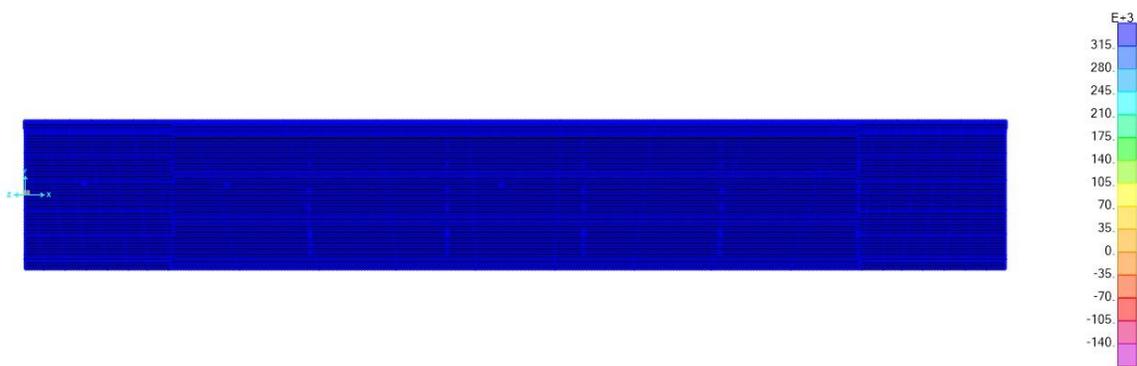


Figura 2.17 Mallado de 0.25 m de tamaño para tensiones. (CSiBridge)

Se realizaron gráficos con las mediciones tomadas a cada uno de estos puntos en los diferentes tamaños de mallados, con lo que se obtuvo que a medida que el tamaño de este disminuye la precisión de los valores de tensión en los puntos aumenta y por tanto lo hace el modelo, siendo así este último mucho más detallado y preciso.

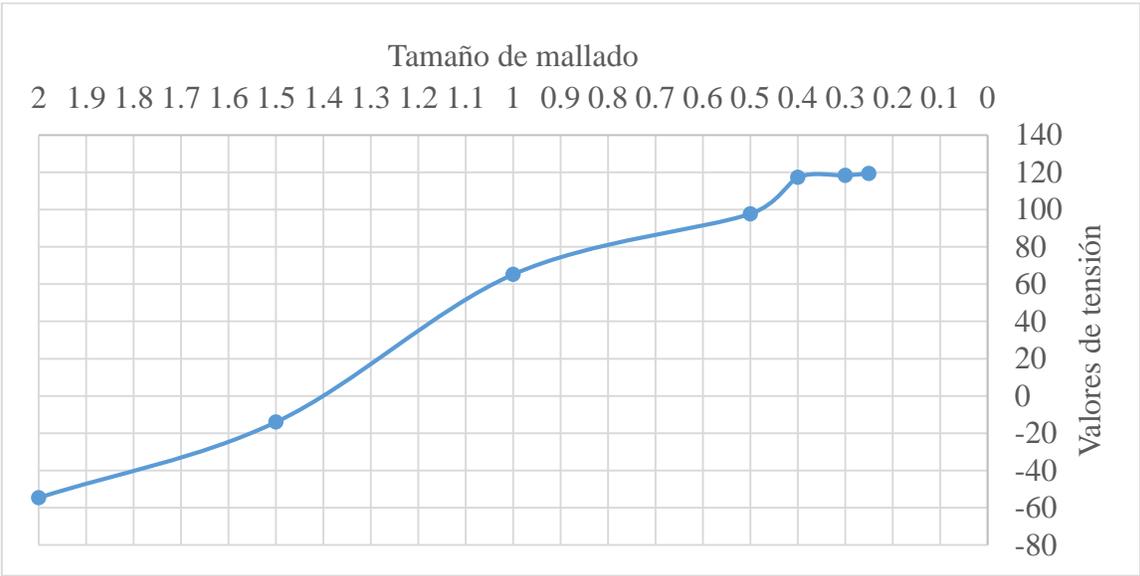


Gráfico 2.1 Valores de tensión en el punto 1. (CSiBridge)

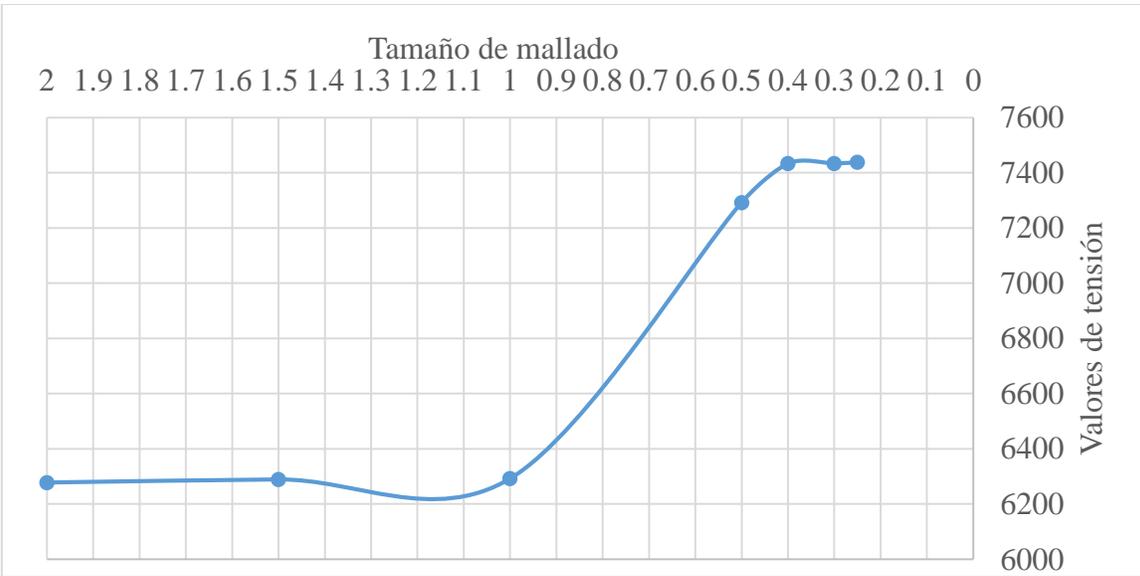


Gráfico 2.2 Valores de tensión en el punto 2. (CSiBridge)

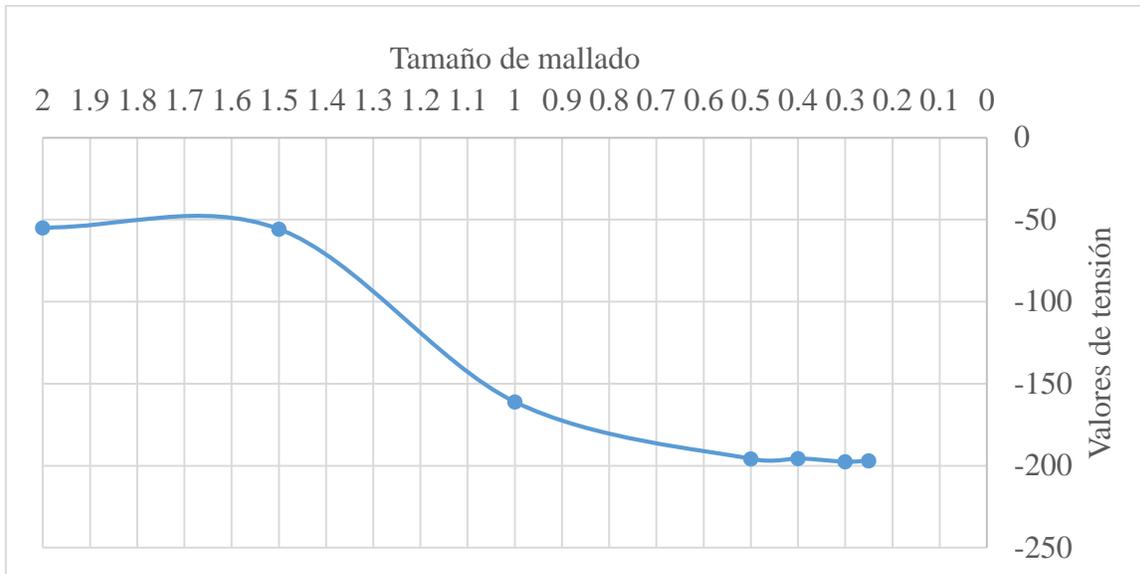


Gráfico 2.3 Valores de tensión en el punto 3. (CSiBridge)

Con los resultados obtenidos a partir del tamaño de malla 0.4 m hasta 0.25 m, que es el más pequeño de los analizados, se puede afirmar que la calibración del malla es correcta pues en este rango el comportamiento de las tensiones es prácticamente constantes.

2.10 Conclusiones parciales

La estructura corresponde a un puente vehicular de hormigón armado de tipo viga cajón, que presenta un sistema de postesado exterior al hormigón ubicado en el interior de los cajones, extendiéndose a todo lo largo de la estructura. Este cuenta con dos voladizos macizos de 13 m cada uno y una luz central de 61 m donde se ubican los cajones y diafragmas. Posee 2 configuraciones diferentes en su sección transversal, de manera continua. La estructura descansa en las uniones de voladizos con la luz central sobre aparatos de apoyo que descansan en una pila de hormigón semi-masivo. Los voladizos tienen su extremo exterior libre.

Se tienen en cuenta 6 estados de carga diferentes, con variaciones en sus factores de ponderación y la forma de aplicación de la misma, para analizar el comportamiento de la

estructura en diferentes situaciones y estados. También se determinan las deformaciones y puntos más críticos.

2.11 Resultados esperados

La modelación computacional resulta una valiosa herramienta para el análisis y diseño de estructuras. Permite realizar pruebas en condiciones reales sin estar físicamente en la locación de la estructura, que en muchas ocasiones por el tamaño y la complejidad de la misma son muy improbables realizarlas. Aporta resultados con tal nivel de exactitud que no pudiera alcanzarse de ser de otra forma. Una ventaja de esta herramienta está en las oportunidades de y opciones de simulación de cargas en condiciones controladas que reducen considerablemente los errores en la obtención de sus valores.

Luego de la puesta en marcha del modelo se espera obtener de los resultados que, para todos los esquemas de carga propuestos, tanto del Estado Límite de Utilización como del Estado Límite Último, los valores de desplazamiento vertical máximos en ellos no superen la flecha máxima permisible del puente de 174 mm.

Capacidad portante de los elementos que componen la estructura del puente utilizando el coeficiente de ratio (tensión actuante entre la tensión admisible del material) brindado por el modelo para cada estado de carga propuesto y así obtener a qué porcentaje de la capacidad real del puente está trabajando su estructura.

El análisis modal de la estructura configurado para la obtención de 12 modos, ejecutado totalmente por separado para obtener los modos de vibración y oscilación a través del período y la frecuencia de ciclos por segundo. En este análisis se comparan los resultados obtenidos de los resultados obtenidos de las oscilaciones producidas en la estructura por los esquemas de carga y las modales para saber si existe alguna semejanza entre ellas que pueda desencadenar un efecto de resonancia y por tanto el colapso de la estructura.

CONCLUSIONES

1. Hoy en día la modelación computacional cobra un gran auge en el análisis de las estructuras bajo cargas dinámicas, con la ayuda de software y herramientas, que a través del Método de Elementos Finitos ofrece la posibilidad de elaborar modelos numéricos de alta precisión que simulan el comportamiento de la estructura a escala real.
2. La modelación estructural resulta, en numerosas ocasiones, una herramienta imprescindible para determinar tensiones y deformaciones de los elementos estructurales, es por esto que todo modelo debe ser correctamente elaborado definiendo secciones, material, geometría, cargas y vínculos, con una correcta calibración del modelo. En este caso una de las complejidades es la configuración del sistema postesado debido a sus características y las particularidades de su configuración.
3. La validación del mallado es un tema de suma importancia en la elaboración del modelo que permite obtener, según su configuración de tamaño, menor o mayor precisión en la obtención de los valores esperados. En este punto en específico el modelo adquiere mayor precisión a partir del tamaño de mallado de 0.4 m hasta 0.25 m que es el último analizado, por lo que permite un mejor entendimiento del comportamiento de la estructura ante las cargas que sobre él actúan.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir investigando este tema, con el objetivo de desarrollar futuras investigaciones donde se puedan realizar la modelación computacional de los puentes más importantes de la provincia, con el objetivo de determinar su capacidad estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALFONSO, I., IGLESIAS, V. R. & FIGUEROA, I. A. 2015. Potencialidades computacionales del Método de los Elementos Finitos para la modelación y simulación de materiales compuestos: revisión. *MATERIA*.
2. ARESTUCHE, L. G. & PÉREZ, R. R. 2009. *Puentes de Matanzas*.
3. BIOENGINEERING, N. I. O. B. I. A. 2016. Modelado Computacional. *US. Department of Health & Human Services*.
4. CALDERÓN, G. & GALLO, R. 2011. *Introducción al Método de los Elementos Finitos: un enfoque matemático*. Posgrado en matemáticas, Universidad de Los Andes.
5. DELGADO, P. A. H. 2018. Informe de Inspección del Puente de la Circunvalación sobre el Rio San
6. Juan, en la Ciudad de Matanzas. EMPAI.
7. G.NAWY, E. 1989. *Prestressed Concrete*, Prentice Hall.
8. GARCÍA, J. M. 2017. *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas con VENSIM PLE*, Juan Martín García.
9. LIN, W. & YODA, T. 2017. Chapter Four - Loads and Load Distribution. *In: YODA, W. L. A. T. (ed.) Bridge Engineering*. Butterworth-Heinemann.
10. MÖLLER, D. P. 2014. *Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation*, Springer.
11. NILSON, A. H. 1987. *Design of Prestressed Concrete*, John Wiley & Sons.
12. NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2003. NC 285 CARGA DE VIENTO. MÉTODO DE CÁLCULO.
13. NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2009. NC 733 CARRETERAS — PUENTES Y ALCANTARILLAS — REQUISITOS DE DISEÑO Y MÉTODO DE CÁLCULO.
14. NORMALIZACIÓN, O. N. D. 2017. NC 46 CONSTRUCCIONES SISMORRESISTENTES - REQUISITOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO Y CONTRUCCIÓN.

15. PERALTA, J. A., LÓPEZ, P. R. & MUÑOZ, A. G. 2009. El fenómeno de la resonancia. *Latin-American Journal of Physics Education*, 3, 18.
16. RAO, S. S. 2012. *Vibraciones Mecánicas (5a edición)* Pearson Educación, Pearson Education, Inc.
17. SIRCOVICH-SAAR, O. 2006. *Dynamics in the practice of structural design*, WIT Press.
18. TORO, A. C. A. D., FERNÁNDEZ, N. & DOMÍNGUEZ, L. R. 1997. Reparación Puente sobre Río San Juan. Circunvalación Matanzas. EMPAI.
19. TORO, S. C., MARMOLEJO, M., MARULANDA, J., CRUZ, A. & THOMSON, P. 2018. Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones. *Construction and Building Materials*, 188, 490-504.
20. WILSON, E. L. 2002. *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures A Physical Approach With Emphasis on Earthquake Engineering*, Computers and Structures, Inc.