

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



**“ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE CARGA DEL PUENTE NUEVO DE
BUEY VACA”**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Raiza Domínguez García.

Tutor: MSc. Ing. Alejandro Hernández Hernández.

Matanzas, 2019

*“El trabajo no ensucia. No digas nunca de un obrero que sale de su trabajo “va sucio”.
Debes decir: “tiene en su ropa las señales, las huellas del trabajo”. Recuérdalo.*

-Edmundo de Amicis

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

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

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

DEDICATORIA

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional y su paciencia durante todos estos años.

RESUMEN

La Modelación estructural es el proceso mediante el cual se representa el comportamiento de la estructura lo más real posible. En la ciudad de Matanzas conocida como la “Ciudad de los Puentes” la mayoría de estas estructuras no cuenta con un modelo que nos permita conocer cuál es el estado actual de las mismas. En este trabajo se presenta el modelo computacional del Puente Nuevo de Buey Vaca ubicado la Vía Matanzas-Varadero específicamente donde la carretera cruza el río Buey Vaca. Constituido por piezas de hormigón prefabricado, el puente cubre una distancia de 80 metros con una subestructura formada por 4 pórticos sobre el cual descansan 11 vigas longitudinales isostáticas de 20 metros que sostienen el tablero de 12.39 metros de ancho formado por losas de hormigón prefabricado con una capa adicional de hormigón que fusiona todas las piezas. El modelo está concebido con todas las características reales de la estructura según los planos y memorias descriptivas consultados y una vez realizado se somete a distintos escalones de carga donde varían los factores cantidad de vehículos y velocidad de vehículos. En el análisis de los resultados se verifica que la velocidad no influye en los esfuerzos a los que se somete la estructura los cual fueron en todos los casos menores que las cargas que puede resistir el puente actualmente. A pesar de que no debe existir riesgo de fallo por las cargas actuantes, es necesario una reparación del puente que logre mejorar su estética y su confiabilidad ya que son muy visible los problemas de socavación y falta de limpieza que presenta.

Palabras Claves: modelación, modelo, puentes, estructura, softwares, SAP2000, cargas, elementos, hormigón.

ABSTRACT

Structural Modeling is the process by which the behaviour of the structure is represented as real as possible. In the city of Matanzas known as the "City of Bridges" most of these structures do not have a model that allows us to know what the current state of them. This paper presents the computational model of the New bridge of Buey Vaca located on the line Matanzas-Varadero, specifically where the road crosses the river Buey Vaca. Made up of prefabricated concrete parts, the bridge covers a distance of 80 meters with a substructure formed by 4 frames on which 11 longitudinal isostatics beams of 20 meters rest that support the 12.39 meters wide board formed by prefabricated concrete slabs with a additional layer of concrete that fuses all the pieces. The model is designed with all the real characteristics of the structure according to the plans and descriptive reports consulted and once it is made, it is subjected to different loading steps where the factors of vehicle quantity and vehicle speed vary. In the analysis of the results it is verified that the speed does not influence the efforts to which the structure is subjected, which were in all cases less than the loads that the bridge can currently resist. Although there should be no risk of failure by the loads acting, it is necessary a repair of the bridge that manages to improve its aesthetics and its reliability because the problems of undermining and lack of cleanness are very visible.

Keywords: modeling, model, bridges, structures, software, SAP2000, loads, concrete

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1: Marco teórico referencial de la investigación	5
1.1 Modelación Estructural.....	5
1.1.1 Generalidades.....	5
1.1.2 Clasificación de Elementos a modelar.....	6
1.1.3 Etapas de la modelación estructural.....	7
1.1.3.1 Etapas de un proyecto de modelación computacional	7
1.1.4 Tipos de modelación:.....	9
1.1.5 Programas para modelar:	9
1.1.6 Ventajas y desventajas de la modelación computacional	13
1.1.7 Método de elementos finitos.....	13
1.1.7.1 Etapas para solucionar problemas mediante MEF.....	14
1.1.7.2 Tipos de Elemento Finito.....	15
1.1.7.3 Importancia del Método de Elementos finitos	16
1.2 Puentes de carretera	16
1.2.1 Generalidades:.....	16
1.2.2 Materiales utilizados en la construcción de los puentes.....	17
1.2.3 Clasificación de los puentes.....	17
1.2.4 Tipos de puentes y sus características.....	19
1.2.5 Partes constitutivas de los puentes	22
1.2.6 Funcionamiento de los Puentes e Intervención de las fuerzas en la construcción de los Puentes.....	25
1.2.7 Cargas Circulantes:	26
1.2.8 Evolución de las cargas vehiculares en el tiempo. Su influencia	27
1.2.9 Deterioro de los puentes.....	31
1.3 Modelación Estructural de los Puentes	33
1.3.1 Estrategia de Modelado Estructural de Puentes.....	34
1.4 Conclusiones Parciales.....	35
Capítulo 2 Modelación Estructural del Puente Nuevo de Buey Vaca	36
2.1 Levantamiento del Puente Nuevo de Buey Vaca.....	36
2.1.1 Características generales del proyecto de ejecución del Puente Nuevo de Buey Vaca.....	36
2.1.2 Geometría, vínculos estructurales y materiales	37
2.1.3 Piezas del Catálogo de Elementos Prefabricados del Sistema Soviético para Puentes de Carreteras utilizados en la ejecución del puente. Secciones.....	39
2.1.3.1 Subestructura.....	39
2.1.3.2 Superestructura	40
2.1.4 Estado de deterioro que presenta el puente.....	42
2.2 Descripción del Modelo.....	45
2.2.1 Geometría y vínculos de los elementos	45
2.2.2 Materiales.....	46
2.2.3.1 Peso propio según los materiales de la estructura y sus accesorios	47
2.2.4 Estados de carga.....	51
2.3 Conclusiones Parciales.....	54

Capítulo 3: análisis de la capacidad portante de la estructura y su desempeño ante las cargas impuestas.	55
3.1 Análisis de los resultados obtenidos en los modelos del Puente Nuevo de Buey Vaca.....	55
3.1.1 Deformación.	55
3.1.2 Momentos Flectores.....	56
3.1.3 Momento flector y Fuerza Axial en las columnas.	59
3.2 Comparación de los resultados obtenidos en el Modelo Computacional con los valores permisibles de la estructura.	61
3.2.1 Diagrama de Interacción de las Columnas del Puente Buey Vaca.	61
3.2.2 Cálculo de Momento Nominal en las Vigas.	65
3.2.3 Comparación de los resultados.	67
3.3 Conclusiones parciales.....	67
Conclusiones	69
Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas	71

INTRODUCCIÓN

Los puentes de carretera son estructuras fundamentales en el normal desarrollo y desenvolvimiento de las ciudades, muy complejo resulta en ocasiones su construcción debido a diversos factores, pero a veces más complicadas resultan las reparaciones, sobre todo cuando presentan un elevado deterioro producto a la falta de mantenimiento.

No en pocas ocasiones los puentes tienen una vida útil elevada, lo que significa muchas veces que las cargas a las que están sometidas evolucionan en el tiempo, por el propio desarrollo de los medios de transporte o sencillamente cambios en los flujos vehiculares y otros factores; por lo que se hace necesario evaluar su capacidad portante, evidentemente si existiera un modelo computarizado de estas estructuras sería muy sencillo incorporarle los nuevos esquemas de cargas y analizar su efecto, sin embargo en la actualidad en la provincia de Matanzas, conocida como la ciudad de los puentes precisamente por el número elevado de estas estructuras que están presentes en ella no cuenta con modelos computacionales de la mayoría de estas estructuras.

Siendo declarado como problema de la investigación como elaborar el modelo computacional de un puente de carretera de modo tal que permita evaluar su estado estructuralmente ante las cargas actuales y futuras.

Planteándose como hipótesis: si se elabora el modelo computacional de un puente de carretera usando un software especializado en modelación estructural, es posible obtener su capacidad nominal de carga o analizar su desempeño ante diferentes escalones de cargas.

Objetivo general: Analizar el desempeño o comportamiento estructural del Puente Nuevo de Buey Vaca, a partir de su modelo computacional.

Objetivos específicos:

1. Analizar el estado del arte referente a la modelación estructural y la evaluación de puentes de carretera.

2. Elaborar el levantamiento estructural del caso seleccionado.
3. Elaborar el modelo estructural del puente teniendo en cuenta geometría, materiales, uniones, apoyos y cargas.
4. Analizar la capacidad portante de la estructura y su desempeño ante las cargas impuestas.
5. Tareas de la investigación:
 1. El análisis del estado del arte referente a la modelación estructural y la evaluación de puentes de carretera.
 2. La elaboración del levantamiento estructural del caso seleccionado.
 3. La elaboración del modelo estructural del puente teniendo en cuenta geometría, materiales, uniones, apoyos y cargas.
 4. El análisis de la capacidad portante de la estructura y su desempeño ante las cargas impuestas.

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: Modelación estructural, métodos más utilizados para la modelación estructural, puentes de carreteras, tipología de puentes, cargas circulantes en puentes.

Capítulo 2: Se realiza un levantamiento del puente teniendo en cuenta su geometría, vínculos estructurales, materiales y las cargas, así como su estado de daño, además se elabora su modelo en un software especializado en este fin.

Capítulo 3: Se realiza el análisis del comportamiento estructural de los elementos que componen el puente, determinando así su capacidad portante.

Conclusiones: A partir de los objetivos trazado, la situación polémica planteada y utilizando los métodos de investigación se obtienen los resultados y se arriban a conclusiones que respondan los objetivos

Recomendaciones: Se sugiere el seguimiento y desarrollo de la investigación tanto a la Universidad como a las entidades interesadas en el tema contribuyendo a un mayor conocimiento del estado actual de los puentes y las construcciones en la provincia y el país.

Bibliografía

Anexos

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO REFERENCIAL DE LA INVESTIGACIÓN:

1.1 Modelación Estructural:

La modelación estructural es el proceso mediante el cual se realiza una idealización matemática que representa la conducta real de la estructura a construir lo más real posible. (Pérez 2018)

Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un "objeto", no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el "objeto" modelado y está en condiciones de sustituir al "objeto" que se estudia, permitiendo obtener información susceptible de comprobaciones experimentales.(Recarey 1999)

1.1.1 Generalidades:

Este proceso desempeña un papel importante para dar solución a problemas existentes en el campo de la ingeniería convirtiéndose en importantes herramientas de trabajo por lo cual la utilización de los modelos para sistemas en general es una de las tareas científicas más importantes a desarrollar en la actualidad. (CASTANEDA 2018)

Al iniciar los análisis estructurales la dificultad más grande que se encuentra es modelar la estructura, ya que es aquí donde se trata de definir las dimensiones de los componentes estructurales con una precisión adecuada para garantizar la compatibilidad final de la solución estructural.

La solución que se elija debe garantizar su viabilidad, funcionalidad y el equilibrio, las dimensiones de los componentes estructurales deben ser aceptables para los espacios funcionales de la construcción al igual que para su economía. (Pérez 2018)

Se supone que cuando se realicen el análisis y la verificación detallados de la estructura las dimensiones de los componentes serán confirmadas con variaciones poco significativas. (Pérez 2018)

A continuación se proporcionan una serie de conceptos fundamentales para garantizar el total entendimiento de lo que significa la Modelación. Los mismos son:

Modelación: proceso que sirve para representar o describir otra cosa, es decir crear prototipos (primer diseño). El modelo puede tener una forma semejante o ser totalmente distinto de un objeto real. (Pérez 2018)

Modelo: una representación simplificada de un sistema real, un proceso o una teoría, con el que se pretende aumentar su comprensión hacer predicciones y posiblemente ayudar a controlar el sistema. (Pérez 2018)

Analógico: Modelo con apariencia física distinta al original, pero con comportamiento representativo. (Pérez 2018)

Analítico: Relaciones matemáticas o lógicas que representen leyes físicas que se cree gobiernan el comportamiento de la situación bajo investigación. (Pérez 2018)

1.1.2 Clasificación de Elementos a modelar:

Los elementos estructurales se clasifican en unidimensionales, cuando una de sus dimensiones es mucho mayor que las restantes, bidimensionales, cuando una de sus dimensiones es pequeña comparada con las otras dos, y tridimensionales cuando ninguna de sus dimensiones resulta ser mayor que las otras. (GÓMEZ 2012)

Para realizar un modelado que garantice un buen desempeño en las construcciones se debe realizar un modelado fiel de la estructura que incluya los componentes más significativos, un análisis confiable que suministre la respuesta dinámica ante el sismo de diseño y los vientos de diseño, un diseño detallado y cuidadoso que le permita a la estructura disipar energía, en relación con los factores de ductilidad o de reducción adoptados, una construcción acorde con el proyecto estructural. (Barreda 2018)

Según (GÓMEZ 2012) los métodos de cálculo para abordar el análisis global de una estructura se clasifican en:

1. Análisis lineales: Están basados en la hipótesis de comportamiento elástico-lineal de los materiales constitutivos y en la consideración del equilibrio en la estructura sin deformar (análisis en primer orden).

2. Análisis no lineales: Tienen en cuenta la no linealidad mecánica, esto es, el comportamiento tenso-deformacional no lineal de los materiales, y la no linealidad geométrica, es decir, la consideración de las condiciones de equilibrio sobre la estructura deformada (análisis en segundo orden). Estos pueden considerar, a su vez, una sola o ambas de las causas de la no linealidad citadas.

1.1.3- Etapas de la modelación estructural:

La modelación estructural atraviesa diferentes etapas, las mismas se encuentran esquematizadas a continuación:



Figura 1.1 Esquema de proceso de modelación. (GARCÍA 2016)

1.1.3.1- Según (Pérez 2018) las Etapas de un proyecto de modelación computacional:

- Formulación del problema: En este paso debe quedar perfectamente establecido el objeto de la investigación.
- Se debe establecer si el proyecto a modelar será de comprobación o un trabajo de optimización estructural.

- **Definición del sistema:** El sistema a modelar debe estar perfectamente definido.
- **Formulación del modelo:** Comienza con el desarrollo de un modelo simple que captura los aspectos relevantes del sistema real, los que dependen de la formulación del problema para el mismo sistema. Este modelo simple se irá enriqueciendo como resultado de varias iteraciones.
- **Colección de datos:** La naturaleza y cantidad de datos necesarios están determinadas por la formulación del problema y del modelo. Los datos pueden ser provistos por registros históricos, experimentos de laboratorios o mediciones realizadas en el sistema real. Los mismos deberán ser procesados adecuadamente para darles el formato exigido por el modelo.
- **Implementación del modelo en la computadora:** El modelo es implementado utilizando algún lenguaje de computación. Existen lenguajes específicos de modelación que facilitan esta tarea; también, existen programas que ya cuentan con modelos implementados para casos especiales.
- **Verificación:** En esta etapa se comprueba que no se hayan cometido errores durante la implementación del modelo. Para ello, se utilizan las herramientas provistas por el entorno de programación.
- **Validación:** En esta etapa se comprueba la exactitud del modelo desarrollado. Esto se lleva a cabo comparando las predicciones del modelo con: mediciones realizadas en el sistema real, datos históricos o datos de sistemas similares. Como resultado de esta etapa puede surgir la necesidad de modificar el modelo o recolectar datos adicionales.
- **Experimentación:** En esta etapa se realizan las pruebas de acuerdo al diseño previo. Los resultados obtenidos son debidamente recolectados y procesados.
- **Interpretación:** Se analiza la sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre. Si es necesario, se deberán recolectar datos adicionales para refinar la estimación de los parámetros críticos.

- Documentación: Incluye la elaboración de la documentación técnica y manuales de uso. La documentación técnica debe contar con una descripción detallada del modelo y de los datos; también, se debe incluir la evolución histórica de las distintas etapas del desarrollo del proyecto. Esta documentación será de utilidad para un posterior perfeccionamiento.

1.1.4- Tipos de modelación:

De acuerdo con (Pérez 2018) a partir del tipo de variables de salida del modelo se obtiene el modo a experimentar el proyecto:

- Análisis: Es el modo más empleado, en él las variables de salida del modelo representan a las variables de salida del sistema real. Este modo se utiliza para estimar la respuesta del sistema real ante entradas especificadas. Debido a que imita un sistema que realmente funciona, el modelo es matemáticamente más estable y se asegura la existencia de una solución.

- Diseño: En este modo las salidas del modelo representan a los parámetros del sistema real. Se utiliza en la etapa de diseño de un equipo donde el problema es determinar los parámetros para los cuales el sistema producirá las salidas deseadas para las entradas especificadas.

- Control: Las variables de salida del modelo representan a las variables de entrada del sistema real. Este modo sirve para determinar los valores que deberán adoptar las entradas del sistema para producir los resultados deseados. Se utiliza cuando se desea determinar las condiciones de operación de un sistema.

1.1.5- Programas para modelar:

De acuerdo con (CASTANEDA 2018) definen actualmente como algunos de los programas de mayor importancia los siguientes:

EverFe 2.25. Es un software libre desarrollado conjuntamente por las universidades de Maine y de Washington (EEUU), financiadas por los departamentos de transporte de los Estados de Washington y de California.

Permite modelar de forma fácil en 3D elementos finitos y simula la respuesta de sistemas de pavimentos en hormigón articulado sometidos a cargas axiales y a fenómenos ambientales, y a encogimientos.

ILLISLAB y WESLAYER. De los primeros softwares para la modelación de losa que emplearon la teoría de láminas delgadas. Estos softwares modelaban la losa como un elemento Shell lineal elástico en 2D. Solo se modelaba una losa de hormigón, sin evaluar el efecto que pudieran generar otras losas.

La subrasante fue recreada como un medio lineal elástico empleando dos formas básicas de representarlo, como un medio discreto de Winckler y los semi-espacios infinitos (Continuos elásticos).

KENSLABS. Se desarrolla para incluir múltiples losas y varios mecanismos de transferencias como el ILLISLABS debido a la evolución de las formulaciones matemáticas y la inclusión de los estudios de las interacciones con las losas contiguas, el efecto de las temperaturas, la no linealidad de los materiales, el comportamiento dinámico de las cargas y la modelación en 3D. La subrasante fue caracterizada como un medio semi-elástico. Se evidenció en trabajos como el de (Huang, 1985). También fueron estudiados la pérdida del contacto con la subrasante y los efectos del refinamiento de las mallas.

DYNA-SLAB (Chatti et al., 1994) Prolongaron el ILLI-SLAB 2D existente a un programa de elementos finitos dinámicos y lineal, llamado DYNA-SLAB, para estudiar los efectos de las cargas dinámicas.

La losa de hormigón fue modelada con elementos de placa y la subrasante fue tratada como un macizo de Winckler o un medio visco-elástico en capas sobre uno rígido o un semi-espacio infinito.

ABAQUS (Kuo et al., 1995). Desarrollaron un modelo de elementos finitos elástico 3D para investigar algunos de los factores que afectan el soporte de un pavimento rígido, incluyendo el espesor de la base y su rigidez, la adherencia en la interface, el calentamiento de la losa y efecto de combado debido a la temperatura y al gradiente de

humedad, la transferencia de carga en las juntas y los anchos de carril. Las tareas que requirieron esfuerzos significativos fueron determinar el óptimo refinamiento de la malla y el mejor tipo de elemento. Tanto elementos de placa 2D (4 nodos y 8 nodos) como brick elements 3D (8 nodos y 20 nodos) fueron considerados para modelar la losa. La base tratada con cemento fue modelada usando otra capa de elementos 3D, mientras que la subrasante fue tratada como un macizo de Winckler.

Para representar la interface entre capas se empleó un elemento de membrana unido a otro elemento con interface especial. El modelo fue verificado comparando las predicciones del modelo con la solución analítica de Westergaard y con las predicciones del modelo de elementos finitos ILLI-SLAB 2D.

NIKE 3D (Brill et al., 1997). En este software a diferencia de la mayoría de los modelos de elementos finitos 3D, la losa fue modelada con elementos de placa de 4 nodos mientras que la subrasante lo fue con elementos lineales hexaédricos de 8 nodos. Fueron considerados diferentes tipos de uniones entre las losas como trabazón de agregados y transferencia de cortante a través de pasadores, ambos modelados con elementos hexaédricos lineales y elásticos. Las tensiones calculadas fueron comparadas con las soluciones analíticas. En la mayoría de los casos las diferencias entre las dos soluciones observadas fueron significativas.

Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2015. Este programa utiliza la tecnología de modelo de objetos de componentes (COM), introducida por Microsoft, que proporciona arquitectura abierta y programable por cualquier ingeniero. Posee una integración abierta con programas como Microsoft Excel, Microsoft Word y AutoCAD.

Fue creada específicamente para el modelado, análisis y diseño de estructuras. Posee potentes técnicas de generación de mallas tanto manuales como de forma automática, que a la vez permiten la obtención de resultados más exactos. Permite a los ingenieros estructurales explorar alternativas de diseño e investigar el comportamiento lineal y no lineal auténtico de cualquier estructura. Presenta gran flexibilidad al obtener resultados de los análisis, pudiéndose ver por elementos individuales, por partes de la estructura o para todo el conjunto, en forma de diagramas y planos.

SAFE. Programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc. en Berkeley, California, EEUU. Es la última herramienta para el diseño de sistemas de pisos de concreto y fundaciones. La maquetación de modelos es rápida y eficiente con las herramientas de dibujos sofisticadas, o utilizar una de las opciones de importación para traer los datos de CAD, hojas de cálculo o programas de bases de datos. Losas y cimientos pueden ser de cualquier forma, y pueden incluir bordes circulares y con curvas spline. Es un programa que automatiza el análisis y diseño de simple a complejas cimentaciones de concreto usando avanzados sistemas de modelación. El programa puede analizar y diseñar losas de formas arbitrarias y de espesor variable, de paneles desnivelados, con aberturas, vigas de bordes y discontinuidades. El enmallado es automático y está basado en parámetros especificados por el usuario. Las cimentaciones son modeladas como placas gruesas sobre cimentaciones elásticas, donde solamente la rigidez a la compresión del suelo es automáticamente sincretizada basada en el módulo de la reacción de la sub-base que es especificada para la cimentación.

SAP2000. Es un programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc. En Berkeley, California, EEUU. Desde hace más de 30 años ha estado en continuo desarrollo, para brindarle al ingeniero una herramienta, confiable, sofisticada y fácil de usar sobre la base de una poderosa e intuitiva interfaz gráfica con procedimientos de modelaje, análisis y diseño estructural a la vanguardia a nivel mundial. Dicho software determina a través del método de elementos finitos la respuesta en términos de fuerza, esfuerzos y deformadas en los elementos de área y sólidos, presentando una salida gráfica y por tablas, haciéndolo una herramienta muy versátil para ingenieros estructurales dedicados a la investigación, desarrollo de proyectos y construcción.(García, 2016).

Cabe señalar que este último es al programa que será utilizado para la modelación de la estructura objeto de este proyecto de tesis.

1.1.6- Ventajas y desventajas de la modelación computacional son:

Ventajas:

- No existe una formulación matemática analíticamente resoluble. Muchos sistemas reales no pueden ser modelados matemáticamente con las herramientas actualmente disponibles. Existe una formulación matemática, pero es difícil obtener una solución analítica. (Pérez 2018)
- Los experimentos son imposibles debido a impedimentos económicos, de seguridad, de calidad o éticos. En este caso el sistema real está disponible para realizar experimentos, pero la dificultad de los mismos hace que se descarte esta opción. (Pérez 2018)
- No existe el sistema real. Es problema del ingeniero que tiene que diseñar un sistema nuevo. El diseño del sistema mejorará notablemente si se cuenta con un modelo adecuado para realizar experimentos. (Pérez 2018)

Desventajas:

- El desarrollo de un modelo puede ser costoso, laborioso y lento.
- Existe la posibilidad de cometer errores. No se debe olvidar que la experimentación se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema real; entonces, si el modelo está mal o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos. (Pérez 2018)

1.1.7- Método de elementos finitos:

En muchos problemas del mundo real se presenta una alta complejidad de geometría de los elementos y el establecimiento de condiciones de fronteras para el análisis de los mismos lo cual impide obtener una solución exacta del análisis considerado, por lo que se recurre a técnicas numéricas de solución de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos físicos.(CASTANEDA 2018)

Uno de los métodos más empleados hoy en día es el método del elemento finito (MEF en español o FEM en inglés) este es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales, utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados elementos finitos. (Pérez 2018)

Las propiedades y las relaciones gobernantes del fenómeno estudiado se asumen sobre estos elementos, y se expresan matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos de los elementos denominados nodos. Estos nodos sirven de conexión entre los elementos. En los modelos sólidos, los desplazamientos en cada elemento están directamente relacionados con los desplazamientos nodales, y los desplazamientos nodales se relacionan a su vez con las deformaciones y los esfuerzos en los elementos. El método de los elementos finitos trata de seleccionar los desplazamientos nodales de forma que los esfuerzos estén en equilibrio (de forma aproximada) con las cargas aplicadas. (GARCÍA 2016)

1.1.7.1- Las Etapas para solucionar problemas mediante MEF según (Pérez 2018) son:

- A. Fase de pre proceso
 - a) Crear y discretizar la solución dominio en elementos finitos, esto es, subdividir el problema en nodos y elementos.
 - b) Asumir una función forma a representar el comportamiento físico de un elemento, que es, una función continua aproximada que se asume para la solución del elemento.
 - c) Desarrollar las ecuaciones para el elemento.
 - d) Armar los elementos a representar en el problema completo, construir la matriz global de rigidez.
 - e) Aplicar condiciones de frontera, condiciones iniciales y cargas.

B. Fase de solución:

a) Resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales simultáneas para obtener resultados globales; tal como valores de desplazamientos y temperaturas en diferentes nodos.

C. Fase de pos proceso.

a) Con base en los resultados globales obtenidos, se puede volver en el proceso de solución para conocer los valores de desplazamiento o temperatura locales en diversos nodos.

1.1.7.2- Tipos de Elemento Finito.

Dependiendo de la dimensión, los elementos básicos se pueden dividir en tres categorías basadas en (Pérez 2018):

1. Elemento de línea: Truss, beam y los elementos de restricción.
2. Elementos de área: Plane stress, plain strain, axisymmetric, membrane, plate y shell.
3. Elementos de volumen: Solid ó brick, tetrahedral y hexahedral son elementos de volumen.

Los criterios para la selección del elemento apropiado para cada aplicación son:

Se debe primero dibujar un bosquejo del sistema físico indicando su geometría, condiciones de frontera, cargas y discontinuidades geométricas o de material. El bosquejo debe además incluir un sistema de coordenadas globales y las dimensiones de la estructura. (Pérez 2018)

Después, se debe examinar si el modelo puede ser reducido, o simplificado. Esfuerzo plano, deformación plana y modelos asimétricos, permiten la reducción de problemas tridimensionales a bidimensionales. Además, la presencia de planos de simetría permite modelar sólo una parte de la estructura. (Pérez 2018)

1.1.7.3-Importancia del Método de Elementos finitos:

Permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Anteriormente era necesario realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo.

1.2- Puentes de carretera:

Un puente es una construcción que permita salvar un accidente geográfico como un río, un valle, un camino, una vía férrea, un cuerpo de agua o cualquier otro obstáculo físico. Su diseño varía dependiendo de su función, y la naturaleza del terreno sobre el que se construya. Al momento de diseñar un puente es de suma importancia tener en cuenta la calidad del suelo o roca donde habrá de apoyarse y el régimen del río por encima del que cruza para así garantizar la vida del mismo. (Romero. 2013)

1.2.1- Generalidades:

La necesidad humana de cruzar pequeños ríos y arroyos fue el inicio de la historia de los puentes. Con el paso de los años el desarrollo de las construcciones los ha llevado desde una simple losa hasta grandes puentes colgantes que miden kilómetros y que llegan a cruzar bahías.

A lo largo de su historia, los puentes se han convertido en un elemento básico para una sociedad y en el símbolo de su capacidad tecnológica.

En la construcción de este tipo de estructuras se deben cuidar diversos aspectos de vital importancia tales como: estabilidad, resistencia al desplazamiento y a la rotura, entre otros. El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y la naturaleza del terreno sobre el que el puente es construido. (Bermúdez 2017)

La NC-733-2009: Carreteras – Puentes y alcantarillas – Requisitos de diseño y método de cálculo, plantea que los puentes: son obras de fábrica que salvan como obstáculo una corriente de agua, en los cuales se requiere para su diseño tener en cuenta los estudios hidrológicos e hidráulicos, como complemento al resto de los estudios que requiere un puente.

1.2.2- Materiales utilizados en la construcción de los puentes:

Se usan diversos materiales en la construcción de puentes. En la antigüedad, se utilizaba principalmente madera y posteriormente roca. Más recientemente se han construido los puentes metálicos, material que les da mucha mayor fuerza.

Los principales materiales que se emplean para la edificación de los puentes son:

- Piedra
- Madera
- Acero
- Hormigón armado (concreto)
- Hormigón pretensado
- Hormigón postensado
- Mixtos

1.2.3- Clasificación de los puentes:

Varios autores basan sus criterios en diferentes conceptos como tipo de material usado, tipo de sección transversal, según la función que realizan y forma estructural que poseen, dentro de los cuales se encuentran (Villarino 2010) y (Gómez 2015)

Clasificación según su utilización:

- Pasarela
- Puentes de carreteras
- Puentes de ferrocarril
- Puentes para el transporte de fluidos

Clasificación según tipo de material:

- Puentes de madera
- Puentes de hormigón armado
- Puentes de hormigón ligero
- Puentes de piedra
- Puentes metálicos
- Puentes de hormigón pretensado
- Puentes de aluminio

Clasificación según la estructura

- Puentes de estructura hiperestática
- Puentes de estructura isostática

Clasificación según la estructura longitudinal

- Puentes de tramo recto
- Puentes de arco
- Puentes colgantes

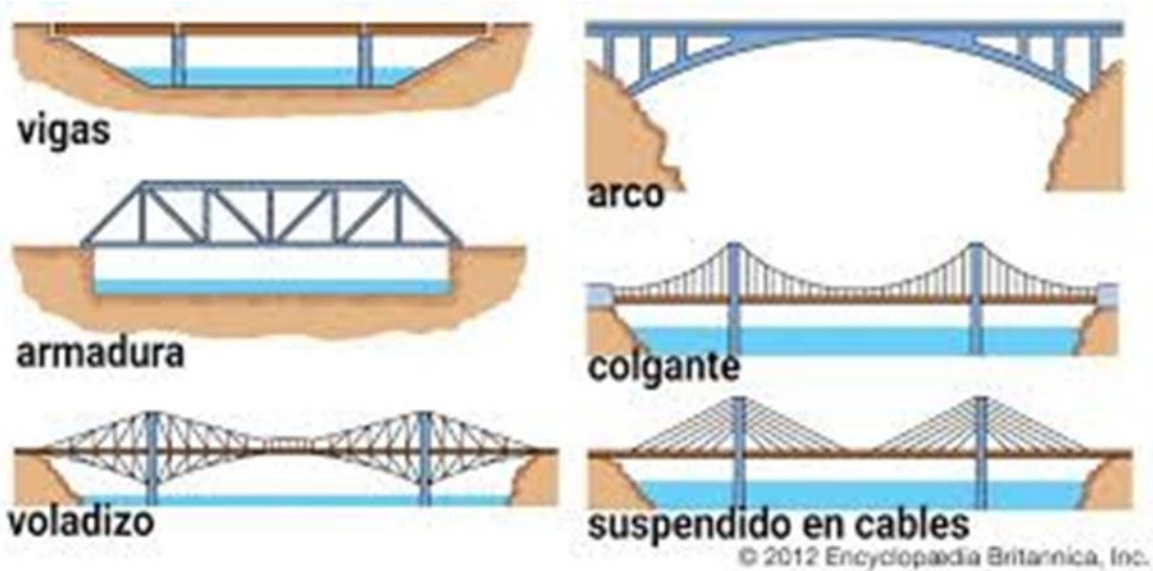


Figura 1.2 Tipos de puentes. (Martínez 2004-2005)

1.2.4 Tipos de puentes y sus características.

Los diferentes tipos de puentes que existen pueden distribuir cargas de distintas maneras y se adaptan a diferentes tipos de ambientes. Los mismos a partir del estudio (Martínez 2004-2005) son:

Puentes de arco: El arco es una estructura que resiste gracias a su forma y estos puentes lo utilizan como su principal componente estructural. El número de arcos que se necesitan varía dependiendo de qué tipo de carga y fuerzas que deben soportar. Es una estructura que salva una luz determinada sometida a esfuerzos de compresión donde las tracciones y flexiones se reducen al mínimo. Debido a su forma en ocasiones no es posible que sea la plataforma del tránsito, por lo cual existen tres variantes para la posición del tablero siendo superiores, inferiores o intermedias. (Martínez 2004-2005)

Puentes viga: Tipo muy básico de los puentes que se apoya en varias vigas de varias formas y tamaños. O sea se apoya sobre piezas rectas horizontales o cuasi-horizontales apoyadas en dos o más puntos que soportan las cargas que actúan sobre ellas mediante su capacidad para resistir flexiones. Los puentes vigas pueden estar inclinados o en forma de V. Su luz máxima puede llegar a ser de hasta 500 m, por lo mismo su estructura puede

formarse por vigas simplemente apoyadas o continuas apoyadas en diversos puntos. (Martínez 2004-2005) Es considerado el puente más elemental del mundo y existen tres tipos de los mismos:

- Losa maciza de hormigón armado o pretensado
- Losa aligerada: Presenta la ventaja de reducir considerablemente el peso.
- Tablero de Vigas de Alma Llena.

Puentes pórticos: Este tipo de puente tiene una estructura intermedia entre los puentes viga y los de arco, por lo mismo presenta características de ambos. Tienen pilas y tablero, además posee un mecanismo resistente complejo porque en él interviene la resistencia a flexión de sus elementos. Al mismo tiempo se produce un efecto pórtico debido a las reacciones horizontales que aparecen en sus apoyos. (Martínez 2004-2005)

Puentes de armadura: Una armadura es un marco triangulado de elementos que actúan principalmente en tensión y compresión. (Martínez 2004-2005)

Puentes cantiléver o voladizos: son similares en apariencia a los puentes de arco, pero apoyan su carga en brazos diagonales y no verticales. (Martínez 2004-2005)

Puentes colgantes: Puentes que utilizan cuerdas o cables de la liga vertical para soportar el peso de la cubierta del puente y el tráfico, y esta es precisamente su característica principal. Su utilización se debe a que el cable es un elemento que trabaja exclusivamente a tracción, se aprovecha al máximo su capacidad resistente puesto que con los tratamientos actuales se logran elevadas resistencia, por su gran flexibilidad puede deformarse transversalmente sin que aparezcan flexiones y permite utilizar en toda la sección toda su capacidad de resistencia, además, el cable está formado por muchos hilos y cordones lo que permite hacer cables de gran diámetro en puentes de grandes luces. (Martínez 2004-2005).

Por lo que se refiere a la tipología de puentes colgantes en cuestión se pueden destacar:

- Puentes catenaria

- Puentes Autoanclados
- Puentes Colgantes de Tablero
- Puentes colgantes de varios vanos

Puentes atirantados: Utiliza cables de cubierta que están conectados directamente a una o más columnas verticales. Los cables se conectan normalmente a las columnas de dos maneras: diseño en arpa (cada cable está unido a los diferentes puntos de la columna) y diseño en ventilador (todos los cables se conectan a un punto en la parte superior de la columna). También el tablero interviene en el esquema de éste tipo de puentes puesto que los tirantes al ser inclinados introducen fuerzas horizontales que se deben equilibrar a través de él. Actualmente son los más comunes debido a que permite hacer puentes ligeros con tableros de canto reducido, pueden tener muchos tirantes muy próximos o pocos muy separados, además es muy apreciado desde el punto de vista estético. (Martínez 2004-2005)

Puentes Flotantes: Consisten fundamentalmente en un tablero apoyado sobre una serie de elementos flotantes que sirven para mantenerlo en una situación más o menos fija. Estos elementos flotantes son muy variados tales como barcas, pontones cerrados, etc. Este tipo de puentes se utiliza normalmente en ríos profundos o donde resulta difícil cimentar. (Martínez 2004-2005)

Puentes Móviles: Son los puentes en los que su tablero o parte de él es móvil con tal de permitir el paso alternativo a dos tipos de tráfico muy diferente. Generalmente el terrestre y el marítimo. De este modo cuando están cerrados permiten el paso de los vehículos rodados o ferrocarriles y cuando están abiertos permiten el paso de los barcos. Estos puentes tienen dos tipos de clasificación las cuales atienden a su traslación. (Martínez 2004-2005)

Primera:

1. Traslación mediante desplazamiento libre
2. Traslación mediante desplazamiento vertical

3. Traslación mediante desplazamiento horizontal
4. Rotación alrededor del eje horizontal
5. Rotación a lo largo del eje vertical

Segunda:

1. Puentes basculantes
2. Puentes giratorios
3. Puentes de desplazamiento vertical
4. Puentes de desplazamiento horizontal.

Puentes trasbordadores: Se utilizan para luces grandes o muy grandes. Consiste en una viga fija situada a la altura requerida por el gálibo de la cual se cuelga una plataforma móvil generalmente mediante cables que transporta los vehículos de una orilla a la opuesta. Luego de 1916 no se ha vuelto a construir ningún puente de este tipo exceptuando el SkyRide de Chicago en 1933. (Martínez 2004-2005)

1.2.5- Partes constitutivas de los puentes:

Los puentes están formados por la superestructura, infraestructura y las fundaciones. La infraestructura es la encargada de soportar la superestructura, transmitiendo las reacciones de las vigas del puente a las fundaciones, y estas transfieren las cargas a los estratos del subsuelo. (Arnal 2000).

La infraestructura de puentes carreteros está compuesta por los apoyos extremos o estribos y los apoyos internos o pilas, las cuales separan al puente en tramos.

La superestructura o conjunto de los tramos que salvan los vanos situados entre los soportes; consiste en el tablero o parte que soporta directamente las cargas dinámicas (tráfico), y las armaduras constituidas por vigas, cables, o bóvedas y arcos que transmiten sus tensiones (cargas) a las pilas y los estribos. (Guzmán 2008).

Los elementos que componen la superestructura y la subestructura definidos por (E 1987); (Glez 1998); (Villarino 2010); Manual de Carretera del Paraguay (2011); (Gómez 2015); son:

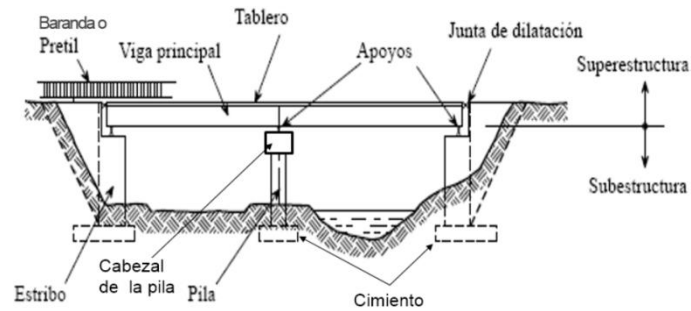


Figura 1.3. Partes constitutivas de los puentes.

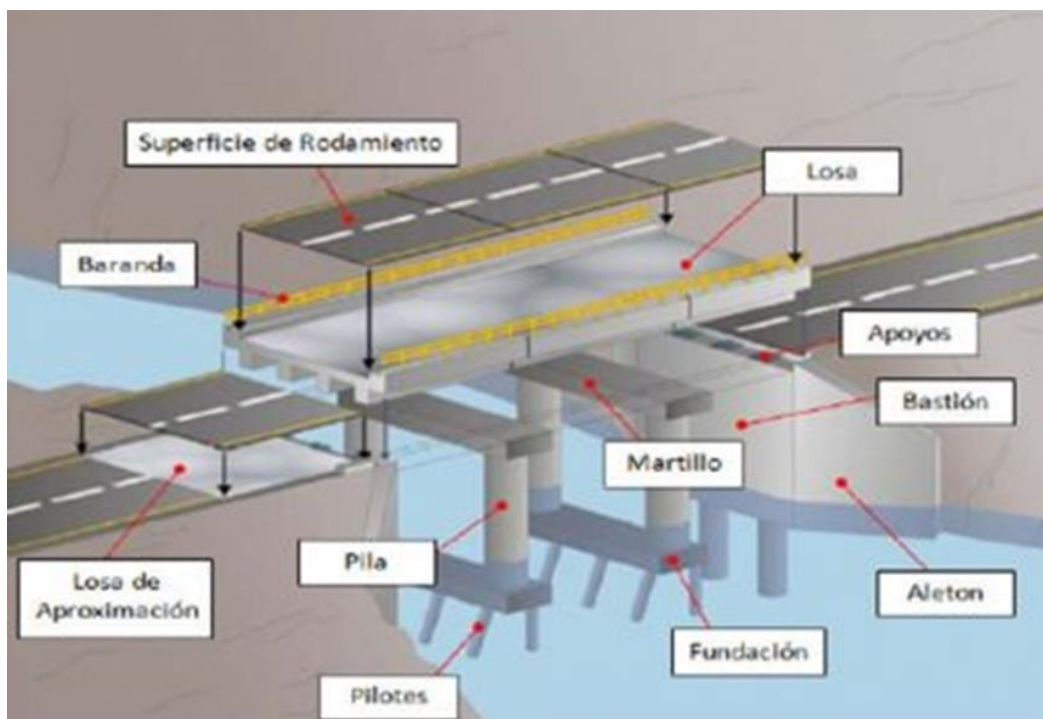


Figura 1.4 partes de un puente. Fuente: Tomada de (Gómez 2015).

Tramo: Porción del puente en la que se sostienen las pilastras o los bastiones.

Ménsula: Es un recurso arquitectónico de aspecto tradicional en el cual se descarga el sobrepeso de las pilas y de los bastiones.

Bastión: Sirve de apoyo para el tramo en la subestructura.

Asiento: Forma parte del bastión en el cual el tramo descansa, también está ubicado en los extremos de los tramos diferentes de las pilas.

Ripio o Relleno: Es sostenido por los estribos y es un sustituto de materiales removidos como la arena, la tierra y las rocas; también sirve de reforzamiento para la resistencia de las pilastras y los bastiones.

Luz de los bastiones: Es la distancia media que existe entre los bastiones consecutivos y las paredes internas de pilas.

Losa de Acceso: Superficie de rodamiento en la cual la ménsula se apoya.

Tablero de un puente: Esta es la base superior del rodaje que se utiliza para repartir la carga a largueros y a vigas en momentos específicos. La estructura del tablero puede estar elaborada para servir de base a una vía férrea, a un canal de riego o a un canal de navegación.

Contraventeo: Este es un sistema que proporciona rigidez a la estructura del puente.

Apoyos: Los apoyos son ensamblajes y placas que son diseñados específicamente para repartir, transmitir y recibir las reacciones de la estructura del puente.

Algunos tipos de apoyos son los balancines y los rodines.

Viga Transversal: Es una armadura de conexión que se localiza entre las vigas principales. Una de ellas son las vigas de celosía.

Vientos o arriostrados laterales: Sirven para conectar a las armaduras y proporcionarles rigidez.

Otras secciones diversas: Las juntas de expansión, los goznes, las placas de unión, los marcos rígidos, la superficie de rodamiento y las vigas de distintas categorías.

Cabeza de Puente: Es una fortificación armada que sirve de protección al extremo de un puente que se encuentra cercano a una posición enemiga.

Pretil: El pretil es un murete de seguridad que se elabora en los puentes para impedir caídas o para establecer límites en una zona de tránsito.

Barandilla: También llamada baranda, es una clase de parapeto que está conformado por balaustres y se utiliza como un elemento de protección.

1.2.6- Funcionamiento de los Puentes e Intervención de las fuerzas en la construcción de los Puentes:

La naturaleza altera constantemente el estado de reposo de los puentes imprimiéndole fuerzas de diferentes modos, tales como sismos, vientos, nieves, diferencias térmicas, fuerzas hidráulicas de los ríos en los pilares, etc. e inclusive los hombres en forma de tráfico, en fin.

La principal diferencia entre los tipos existentes de puentes según el estudio (Flores, Ménez et al. 2009) es las distancias que estos pueden cruzar en un solo palmo, o sea, la distancia entre los dos apoyos del Puente, sean estas columnas o torres.

Para un mejor entendimiento se propone como ejemplo las posibles distancias que pueden abarcar un puente moderno:

- En forma de arco puede cruzar aproximadamente hasta 800 o 1,000 pies (240 a 300 m).
- Un puente de suspensión (el pináculo de la tecnología de puente), es capaz de atravesar hasta 7,000 pies (2,100 m).
- Un puente de viga moderno probablemente alcanza hasta 200 pies (60 metros)

Esta diferencia se debe a la forma en que cada tipo de puente trata con dos fuerzas importantes: la compresión y la tensión. Estas están presentes en todos los puentes, y este

es el trabajo del puente diseñado para lidiar con estas fuerzas sin torcerse o romperse. (Flores, Ménez et al. 2009)

Cuando la fuerza de compresión actuante vence a la capacidad soportante de compresión del puente ocurre el abrochamiento, como mismo puede romper si la tensión actuante supera la capacidad de soportar tensión del puente. Para evitar estos fenómenos es necesario disipar o transferir dichas fuerzas. Para la transferencia es necesario llevarla de un área débil aun área más fuerte, diseñada para resistir la misma, y para disipar las fuerzas actuantes se le debe extender sobre un área más grande. Entonces podemos decir que los puentes en forma de arco son un buen ejemplo de disipación, mientras que los puentes en suspensión lo son de transferencia. (Flores, Ménez et al. 2009)

1.2.7- Cargas Circulantes:

Las cargas exteriores a tener en cuenta según la (NC733 2009)

- La fuerza de frenado y arranque tendrá en todo caso un valor mínimo, que es función de la anchura de la plataforma, pero que no será inferior a 140kN. Superiormente también está limitada por un valor función del ancho de plataforma y nunca superior a 720kN. (Ministerio de Fomento 2000)
- De acuerdo con la IAP, la fuerza centrífuga es función del radio de curvatura en planta, de la velocidad específica del tramo en el que se encuentra el puente y de la masa de la sobrecarga de uso. Los valores habituales de este esfuerzo transversal al puente, suelen situarse entre los 3,0kN/m y los 4kN/m.
- El empuje transversal del viento suele situarse entre 1,5Kn/m de tablero y 3,0kN/m El valor del empuje longitudinal debido al viento, se considera como el 25% del empuje transversal, por tanto, se situará en valores del orden de 0,4kN/m a 1,2kN/m. (Ministerio de Fomento 2000)
- El valor del empuje longitudinal debido al viento, se considera como el 25% del empuje transversal, por tanto, se situará en valores del orden de 0,4kN/m a 1,2kN/m. (Ministerio de Fomento 2000)

- Sismos (En (NC733 2009) página 41) se especifica que:

1- Los análisis de la respuesta sísmica y las consideraciones para el diseño de los puentes se deberán realizar mediante el método estático equivalente o método dinámico del análisis modal, según proceda en correspondencia con la geometría y tipología de la estructura, siguiendo lo especificado en la (NC46 2017)

2-Ante un evento sísmico las estructuras de los puentes se deberán proyectar de acuerdo a la intensidad de la zona de construcción de la obra, aunque en puentes de grandes luces de importancia vital por consideraciones económicas o de otro tipo, podrán ser proyectadas para condiciones extremas.

3-Para el proyecto típico se deberá evaluar la carga sísmica, pudiéndose disponer de soluciones de arriostramiento adicionales para la subestructura en caso de ser necesario.

4- La fuerza sísmica se habrá de combinar solamente con la carga permanente, excluyéndose otro tipo de cargas.

1.2.8- Evolución de las cargas vehiculares en el tiempo. Su influencia:

Estas vías para vencer obstáculos (puentes), fueron creadas para satisfacer situaciones de cargas muy distintas a las actuales, tanto desde el punto de vista del peso como de la variación. En las normativas internacionales se le confiere una gran importancia a la estructura de acuerdo a los niveles de carga para los que se diseñe o esté sometida en correspondencia con el tráfico que circule. Para el ingeniero es vital conocer el comportamiento estructural del mismo para los distintos niveles de carga a los que pueda estar sometido.

Las cargas de los vehículos permisibles es uno de los elementos de mayor importancia para poder realizar la evaluación de las cargas que puede soportar un puente. A medida que el tiempo pasa han ido evolucionado de manera indiscutible los medios de transporte y por tanto los puentes que se construyen, por lo que se hace muy embarazoso poder presagiar que tipos de vehículos circularan por los mismos. (Simanca 2017)

En 1916, se discute el origen de la carga distribuida usada en el diseño de puentes, donde algunas personas tenían la idea de que una manada de ganado vacuno pesaba más por pie cuadrado que una multitud de personas, y esto era tomado en ese entonces como referencia. No siendo realmente el caso, ya que el límite real para lo anterior es aproximadamente 60 libra/pie² [0,291 t/m²]. (Romero. 2013)

Para 1914 se funda la AASHTO, en sus inicios como AASHO, la cual desarrolló el concepto de trenes de camiones en 1935 según los patrones de la industria del ferrocarril:

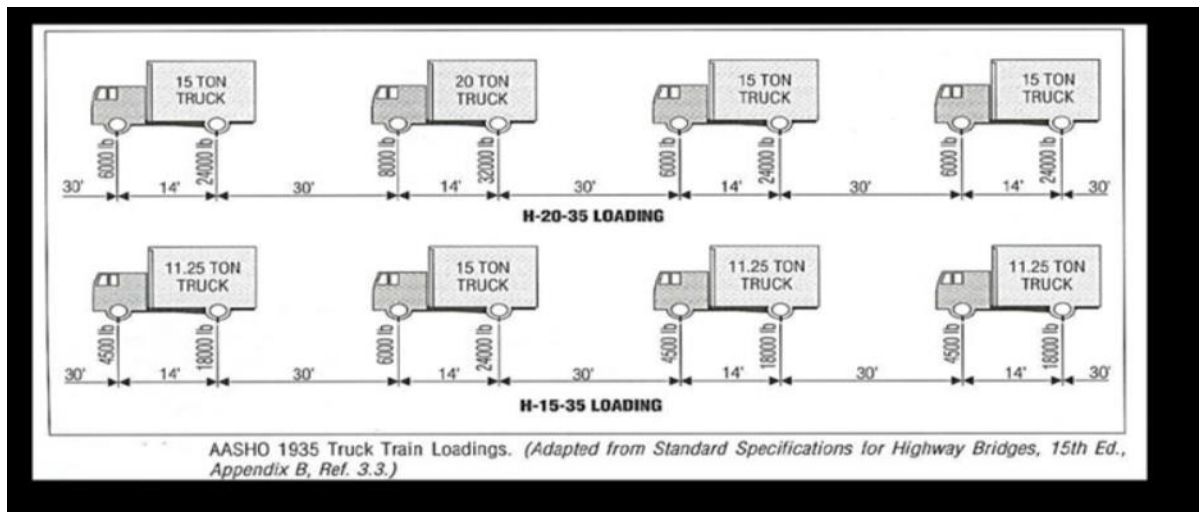


Figura 1.5 Tren de camiones desarrollado por la AASHTO en 1935. Fuente: Lic.Ing Pedro A. Hernández Delgado. Módulo 2: Normativas. Análisis-Diseño. NC. 733.2009 y AASHTO 2002.

En 1944, la AASHTO desarrolló un nuevo concepto denominado camiones hipotéticos, en dos variantes: H (con dos ejes) y HS (con tres ejes) (Figura 3), estos eran camiones usados solamente para el diseño y no se parecían a ningún camión legítimo existente sobre las carreteras.

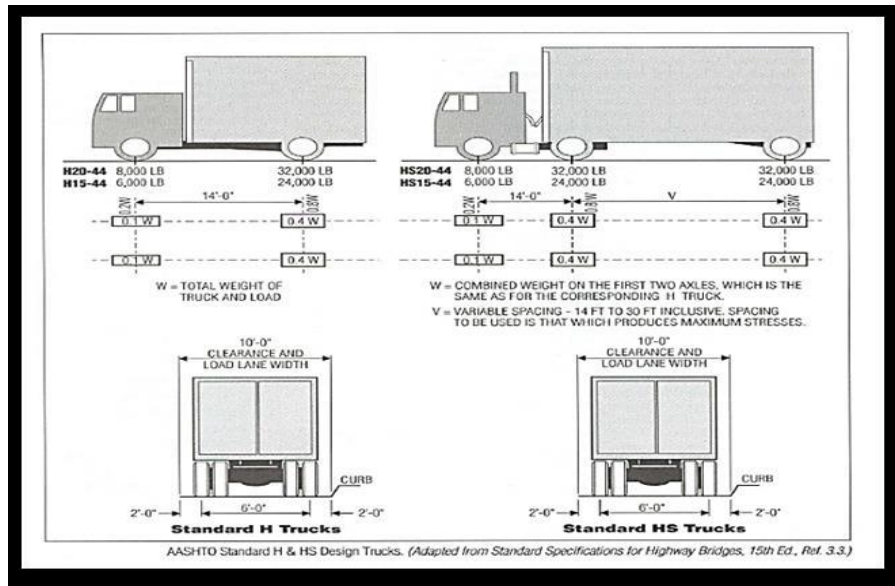


Figura 1.6 Camiones desarrollados por la AASHTO en 1944. Fuente: Lic. Ing Pedro A. Hernández Delgado. Módulo 2: Normativas. Análisis-Diseño. NC. 733.2009 y AASHTO 2002.

En 1974 se establece la primera norma cubana para el diseño de puentes de carretera y ferrocarril. En 1984 se actualiza esta norma, la cual aún está vigente para ferrocarriles. En esta norma se abandona la filosofía de diseño de la AASHTO y se adopta el criterio de la norma soviética, la cual a su vez estaba influenciada por la norma DIN alemana, la más avanzada de Europa. En esta actualización se introduciría el vehículo de carga excepcional NK-80. (Romero. 2013)

Para el 2009 se realizaron modificaciones en la misma, pero permanecían los criterios principales y solo se regresaba al criterio de diseño de la AASHTO. En los puentes de autopistas, carreteras y urbanos, el diseño se realizaría con el vehículo (MS-32) y con el vehículo excepcional de tipo militar (NK-80), de acuerdo a las disposiciones establecidas en la actual norma. El diseño se deberá realizar con el vehículo de cálculo MS-32 con una Carga de Vehículo (CV) de 32 t. (Romero. 2013)

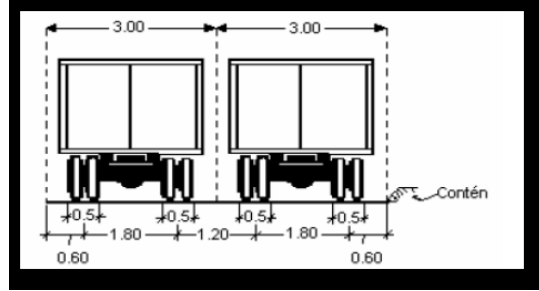
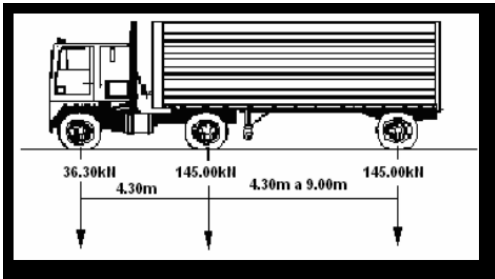


Figura 1.7 Disposición y dimensiones

Figura 1.8. Disposición y dimensiones

longitudinales transversales. Fuente: (NC733 2009)

En la actualidad por los puentes de nuestra provincia y asimismo nuestro país circulan Vehículos Cisternas de CUPET con una capacidad de carga de 60 100 litros para un peso total o carga de vehículo (CV) de 70t.

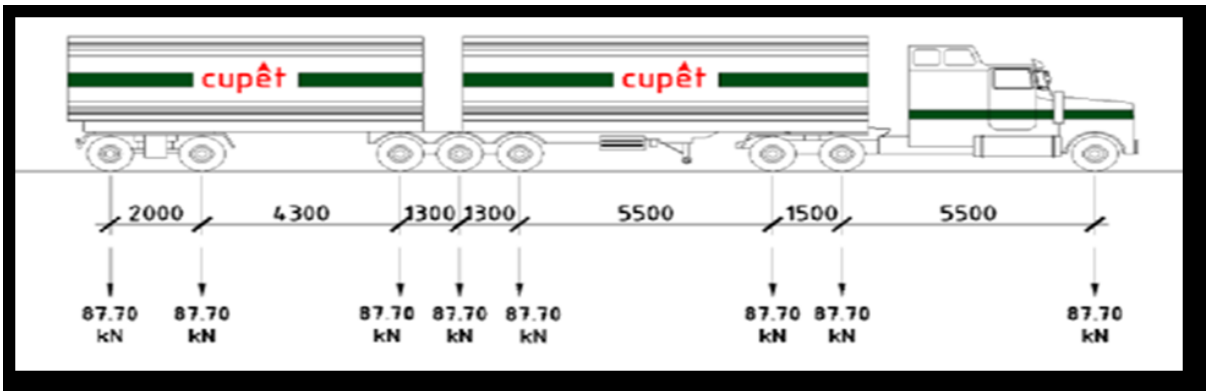


Figura 1.9 Vehículo cisterna de CUPET para un peso total de 70 toneladas. Fuente: Lic.Ing Pedro A. Hernández Delgado. Evaluación de las cargas de vehículos permisibles para el puente Lacret Morlot.

1.2.8.1- Tipo de tránsito según el vehículo de mayor peso:

A continuación tomando como base lo analizado en anteriormente y de acuerdo con (Romero. 2013) se clasifican los tipos de tránsito considerando el vehículo de mayor peso para su categoría:

Tránsito Urbano: este tránsito es originado por las necesidades de la ciudad. Comprende vehículos ligeros, ómnibus (12t) y ómnibus articulados (hasta 19t), camiones (11.2t).

Tránsito turístico: este tipo de tránsito es característico en nuestra provincia pues el desarrollo del sector turístico cada día va más en ascenso. Incluye ómnibus que no sobrepasan las 15t.

Tránsito Industrial: incluye los camiones articulados con remolques (31.9t) y los vehículos cisternas de CUPET (56t-70t)

1.2.9 Deterioro de los puentes:

Con el paso del tiempo están propensos a padecer deterioros físicos causados por diversos factores como la agresividad del medio, la cual se incrementa significativamente, y el aumento del tráfico en los últimos tiempos, aspectos que han propiciado una mayor frecuencia en las reparaciones y posiblemente a una reducción de su capacidad para soportar cargas.

La naturaleza y grado de daño estructural pueden ser descritos en términos cualitativos o cuantitativos, y constituyen un aspecto de primordial importancia para determinar el nivel de deterioro del mismo y así determinar la condición estructural de este.(Romero. 2013)

Según (Romero. 2013) el deterioro estructural de los puentes es producido por una o varias de las siguientes causas:

- Poca planificación de las acciones de mantenimiento.
- Carencia de fondos para la realización de los mantenimientos regulares.
- Inadecuados diseños, detalles y ejecución de las estructuras.
- Agresividad del medio ambiente.
- Proceso de envejecimiento.
- Incremento del volumen de tráfico.

- Incremento del volumen del inventario de puentes.
- Incremento de las cargas axiales en carreteras y ferrocarriles.

Lograr una correcta clasificación correspondería a que la evaluación posterior del puente se base en un nivel asignado según los niveles de deterioro de cada uno de los elementos. Los niveles planteados para evaluación estructural se aplicarán a la superestructura, subestructura y cimiento, escogiéndose la de menor evaluación para toda la estructura en caso de ser desiguales, según el criterio de clasificación, conforme a la (NC335 2004): Inspección y Conservación de Puentes.

Clasificación		Puntuación	Descripción
Muy Bien	MB	5	Defectos sin consecuencias importantes " a priori" con incidencia casi exclusiva en la estética
Bien	B	4	Defectos que indican que la estructura comienza o pudiera tener una futura evolución patológica o algún otro daño o deficiencia que pudiera llegar a ser grave.
Regular	R	3	Defectos que indican que una evolución patológica se está produciendo.
Mal	M	2	Defectos que originan una alteración de la estructura o del puente aunque pueda permanecer en servicio.
Muy Mal	MM	1	Defectos que originan una alteración de toda o parte de la estructura, necesitando una restricción en el uso , apuntalamientos provisionales o puesta fuera de servicio

Figura 1.10 Tabla Clasificación de las patologías típicas en los puentes.(NC335 2004).

Fuente:(NC335 2004).Inspección y conservación de puentes.

La clasificación de los puentes según los criterios de la NC 335:2004

Clasificación	Descripción
Muy Bien	Los puentes nuevos con calidad requerida que no necesiten el mantenimiento correctivo debido a deficiencias de ejecución y aquellos en explotación que por su estado correspondan a uno nuevo o tienen una seguridad adecuada. No presentan deficiencias estructurales y son funcionales. No es necesario apuntalarlo para el paso de las cargas de diseño o sus equivalentes. Se preverá su mantenimiento rutinario.
Bien	En su mayor parte no presentan deficiencias estructurales aunque pueden tener en algún lado, o afectando sus funciones. Requieren un mantenimiento rutinario. Permiten el paso de vehículos de diseño o equivalentes, sin apuntalamiento, garantizando el estado de servicio.
Regular	Presentan deficiencias parciales en la estructura, que reducen las funciones del mismo. Se requiere la reparación parcial. Puede ser necesario apuntalarlo para el paso de los vehículos de diseño o equivalentes y mantiene la seguridad establecida.
Mal	Presenta deficiencias decisivas en uno o varios de los elementos de la estructura que no permiten cumplir las funciones para las cuales se diseñó. Necesita una reparación inmediata y en ocasiones la demolición o sustitución de los elementos o materiales defectuosos. No es posible el paso de las cargas de diseño, aunque pueden pasar cargas menores que la de diseño sin tener que apuntalar.
Muy Mal	Los puentes que presentan graves deficiencias en la mayor parte de la estructura. No pueden cumplir sus funciones. No es posible el paso de las cargas de diseño o su equivalente. Para mantener la seguridad puede requerirse el apuntalamiento cuando actúen cargas ligeras. Requieren una reconstrucción o sustitución.

Figura 1.11 tabla de Clasificación del estado de los puentes. Fuente: (NC335 2004) Inspección y Conservación de puentes código de buena práctica.

1.3 Modelación Estructural de los Puentes:

Para poder lograr una adecuada modelación de los puentes, es necesaria la fragmentación del sistema en subsistemas con un mayor nivel de maniobrabilidad, ya que es bastante complicado considerar en un prototipo global las relaciones existentes entre los componentes estructurales y sus correspondientes relaciones físicas y espaciales, sobre todo en sistemas de configuración espacial compleja, por lo que con fines de modelado se recomienda fragmentar el prototipo global en subsistemas, pórticos, vigas, pilas u otros elementos estructurales independientes. (Quintana and Ayala.)

1.3.1- Estrategia de Modelado Estructural de Puentes:

Clasificación de los más usados enfoques del modelado de sistemas de puentes.

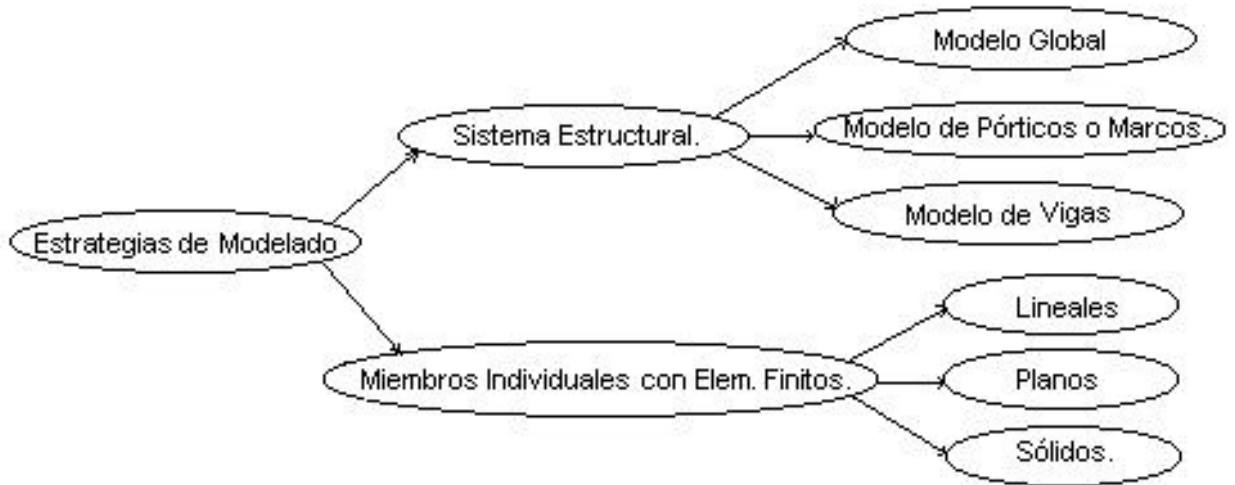


Figura 1.12 Clasificación de los más usados enfoques del modelado de sistemas de puentes. (Quintana and Ayala.)

a) Las estructuras de puentes están compuestas por la superestructura en la mayoría de los casos, fragmentada a través de las juntas de expansión y por la subestructura, que a su vez está compuesta por los cabezales, la cimentación, los marcos, etc. (Quintana and Ayala.)

Modelo Global: Tiene un uso limitado a puentes pequeños puentes formados por un marco único, se obtiene una respuesta aproximada esencialmente en el rango elástico y durante el proceso de análisis estructural se posee una buena caracterización de los apoyos a lo largo de toda la estructura al ser sometido a una determinada acción sísmica. Este tipo de modelo se usa comúnmente para calcular con un análisis espectral la demanda sísmica (fuerzas y desplazamientos elásticos) en un modelo estructural elástico lineal.(Quintana and Ayala.)

Modelo de Marcos: Establece un detallado del modelo seleccionado y se efectúa un análisis no lineal a través del cual es posible obtener una adecuada estimación, tanto de la capacidad como de la demanda sísmica. Este modelo tiene el inconveniente de que es muy difícil poder correlacionar el comportamiento de un elemento con respecto a otro, lo

que trae como consecuencia la disminución de la posibilidad de ocurrencia del fenómeno de resonancia. Esto se contrarresta en el proceso de modelado por medio de la colocación de marcos fronteras o resortes (modelado lineal o no lineal de juntas de expansión).(Quintana and Ayala.)

Modelo de Elementos de Marcos: incluye el efecto de la flexibilidad en la cimentación, que pueden a su vez ser combinado en el modelo de marcos por medio de elementos subestructurados y por restricciones geométricas. En este caso es muy importante la hipótesis de considerar la superestructura infinitamente rígida en su plano, lo cual simplifica notablemente el análisis. (Quintana and Ayala.)

b) La segunda estrategia de modelado (miembros estructurales individuales) define una discretización matemática entre los puntos nodales que intervienen en la definición de un determinado prototipo de puente, compuesto por elementos individuales que modelan los cabezales, las vigas, los marcos, etc.

En las estructuras los elementos están conectados por medio de los nodos definidos de una determinada discretización estructural, compatible con una respuesta modal desconocida y que generalmente es el desplazamiento en un grado de libertad. (Quintana and Ayala.)

1.4 Conclusiones Parciales:

La modelación estructural es el proceso mediante el cual se representa la conducta real de la estructura, es donde se trata de definir las dimensiones de los componentes estructurales con una precisión adecuada para garantizar la compatibilidad final de la solución estructural. En el caso de los puentes que están constituidos por una superestructura (tablero y sus componentes) y subestructura (cimientos, pilas, estribos y vigas) es muy complicado realizar la modelación de un sistema global por tanto se recomienda fragmentar el prototipo global en subsistemas, pórticos, vigas, pilas u otros elementos estructurales independientes.

CAPÍTULO 2 MODELACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE NUEVO DE BUEY VACA:

2.1- Levantamiento del Puente Nuevo de Buey Vaca.

2.1.1- Características generales del proyecto de ejecución del Puente Nuevo de Buey Vaca.

El proyecto de este puente fue realizado en la década de los 90 (1991) al ejecutarse la ampliación de la Vía Blanca en el tramo comprendido entre Matanzas y Varadero, se ubica específicamente donde la vía cruza el Río Buey-Vaca. (Armas and Glez 2001). Se tomó como punto de partida un proyecto anterior del año 1983; en el mismo se contemplaba la ejecución de un puente ubicado en la carretera Matanzas-Canímar para salvar una apertura de 75m de distancia debido a la topografía del lugar, a las viviendas cercanas y a la existencia de un puente paralelo a este, “el puente viejo”, separando a solo 23m de eje a eje. (Hernandez. and Dominguez 1990).

Es un proyecto ejecutado en su totalidad por elementos prefabricados aunque originalmente en el proyecto existían 3 luces de 25m cada una donde se colocarían vigas isostáticas postensadas de la misma dimensión. Cuando se empezó a ejecutar dicho proyecto se presentaron problemas con el suministro de vainas para pasar los cables de postensionado por lo cual se dificultó la fabricación de dichas vigas y fue necesaria la modificación del proyecto original. (Hernandez. and Dominguez 1990)

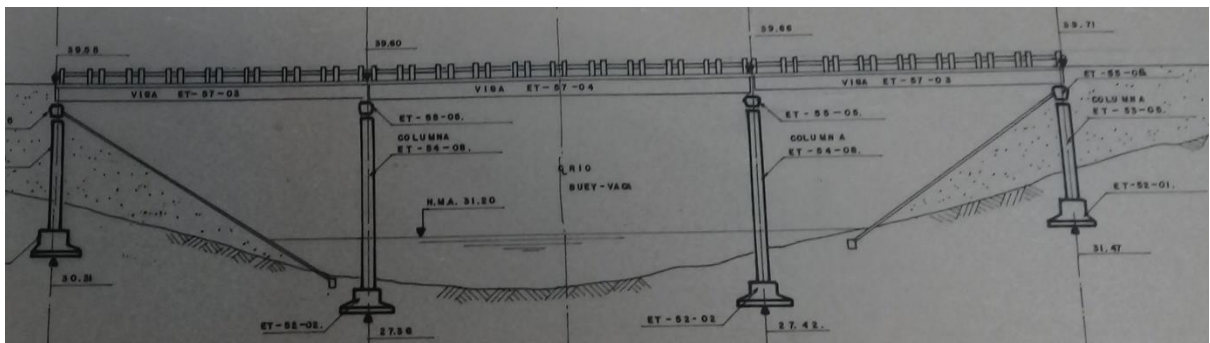


Figura 2.1 Vista longitudinal del Plano general. Memoria descriptiva del Proyecto: Puente Buey Vaca Nuevo. (Hernandez. and Dominguez 1990)

2.1.2 Geometría, vínculos estructurales y materiales:

El nuevo proyecto contemplaba que al permanecer las mismas condiciones topográficas se colocaría una apertura de 80 m formada por 4 luces de 20 m, con vigas de hormigón armado prefabricadas de la misma dimensión y de sección (0.4x0.85) m.

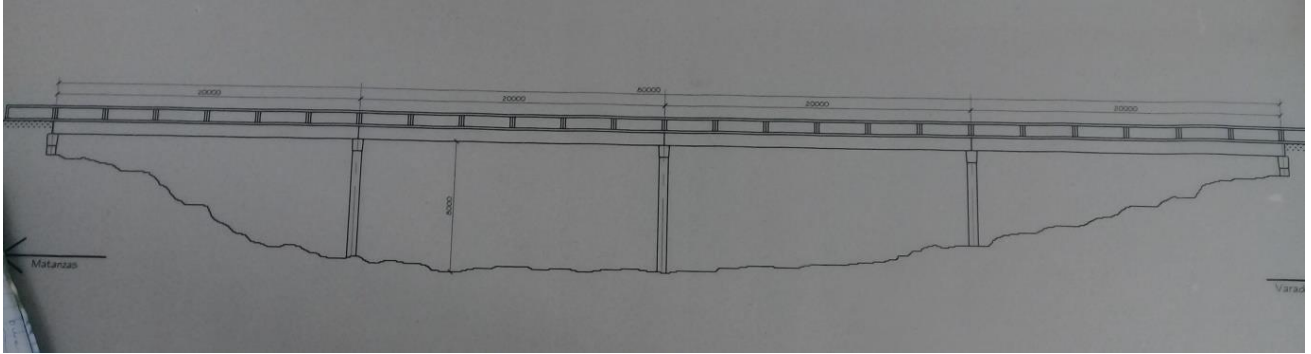


Figura 2.2 Vista longitudinal. Memoria descriptiva del Proyecto de Reparación del Puente Nuevo de Buey Vaca. (Armas and Glez 2001)

Este puente se proyectó según las regulaciones de proyecto para el cálculo y diseño de puentes y alcantarillas y las que corresponden al empleo de hormigón in-situ para el cálculo de obras de hormigón armado, además se emplearon para ello los elementos típicos pertenecientes al Catálogo de Elementos Prefabricados de Puentes de carreteras del sistema soviético. (1975)

Finalmente este proyecto presentaría un puente de carretera que contaba con 4 luces de 20m lo cual suma una apertura de 80m y un ancho de tablero de 12.39m, en cada luz se colocarían 11 vigas isostáticas de hormigón armado de 20m, separadas a 1.2m entre ellas.

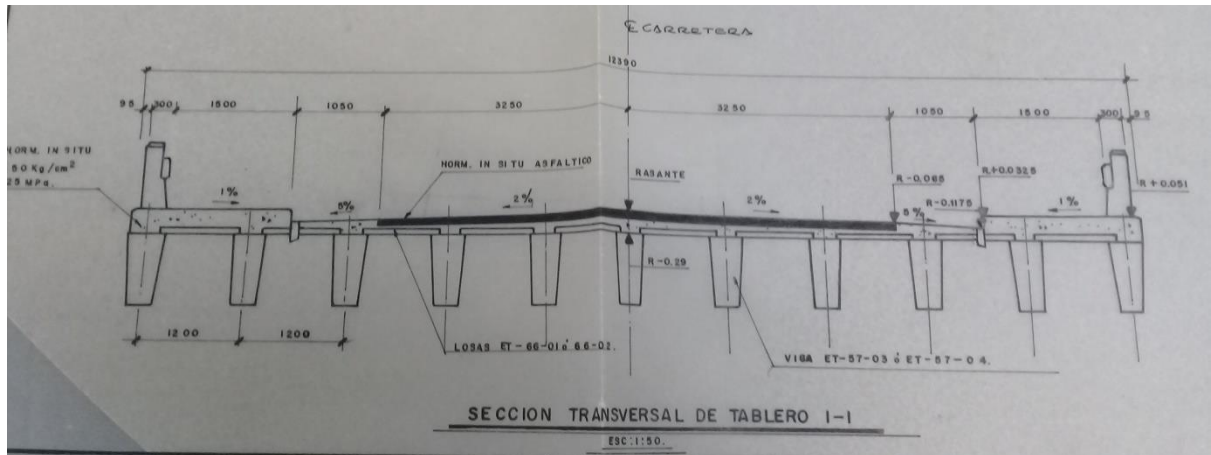


Figura 2.3 Sección transversal del tablero del Puente Nuevo Buey Vaca.(Hernandez and Dominguez 1990)

También forman parte del tablero las losas de hormigón prefabricadas y una losa de hormigón in-situ de 0.10m de espesor con hormigón de 25MPa. Además también existe la proyección de una acera de 0.10m de espesor y 1.5m de ancho que se hormigonará junto con la losa, dicha acera cuenta con barandas de hormigón in-situ de 0.9m de altura. En el proyecto aparece la colocación de una capa de rodadura de 0.08m de espesor y la solución para el drenaje fue la utilización de tubos de hierro fundido de ϕ 100 espaciados a 5m uno de otros a ambos lados del puente. En los aproches una vez vertido el relleno de gravilla se colocó las losas de tacón de apoyo, las losas interiores, losas exteriores y de aproche además se colocaron las piezas de brida para la contención del material.

La subestructura cuenta con cabezales de 6.40m. En los estribos se colocaron columnas de 2m de altura con sección de (0.5*0.6) m, mientras que en las pilas las columnas tienen una sección de (0.6*0.6) m con alturas de 10m en los apoyos 2y3 y altura de 6m en el apoyo 4. En los cimientos se utilizaron vasos prefabricados en estribos y pilas menos en el apoyo 2 en el cual se realizó in-situ.

2.1.3 Piezas del Catálogo de Elementos Prefabricados del Sistema Soviético para Puentes de Carreteras utilizados en la ejecución del puente. Secciones:

2.1.3.1- Subestructura:

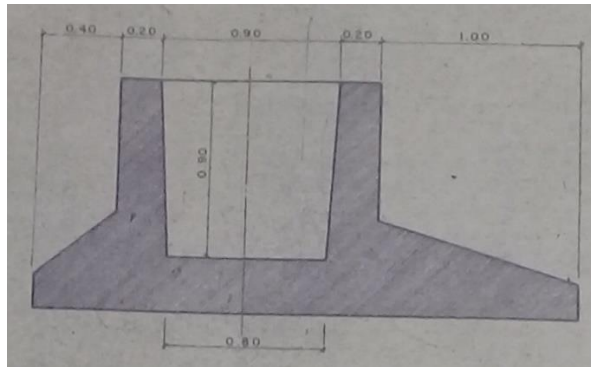


Figura 2.4 Vasos prefabricados para estribos (ET-52-01)(Ivasenko 1975)

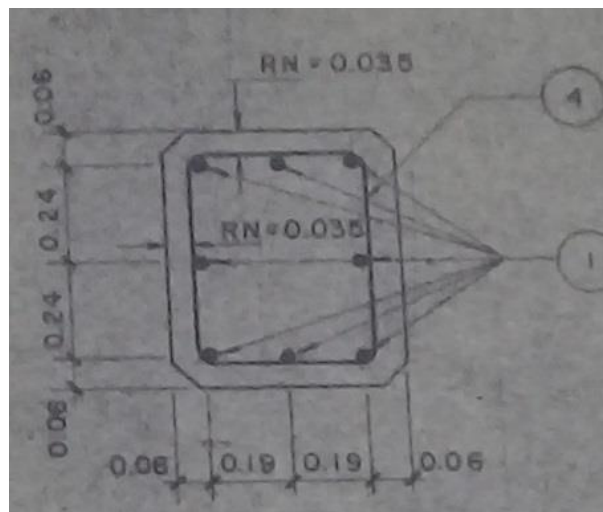


Figura 2.5 Columnas para estribos (ET-53-02)(Ivasenko 1975)

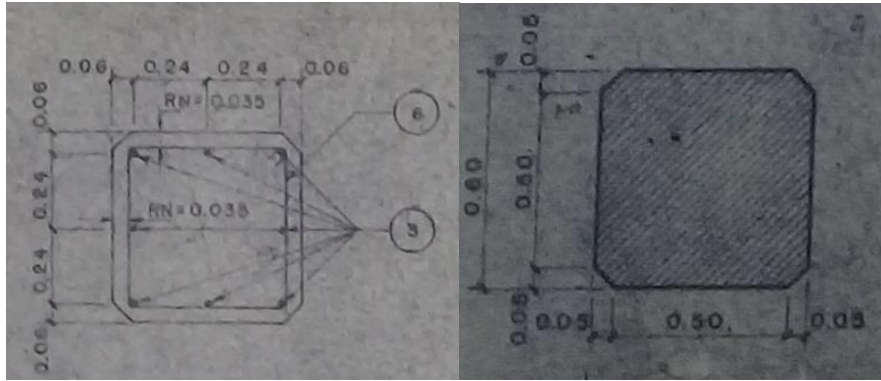


Figura 2.6 Columnas para pilas (ET-54-08)(Ivasenko 1975)

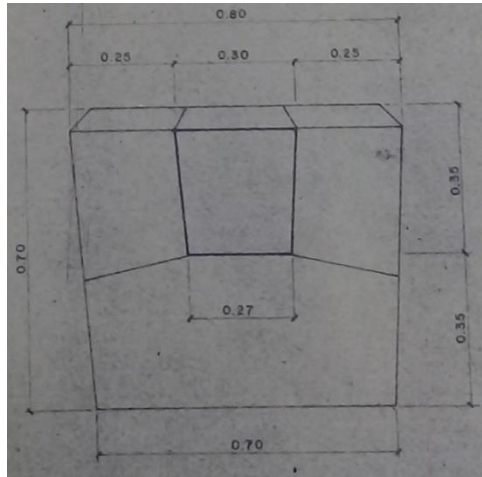


Figura 2.7 Piezas de Cabezales (ET-55-05)(Ivasenko 1975)

2.1.3.2- Superestructura:

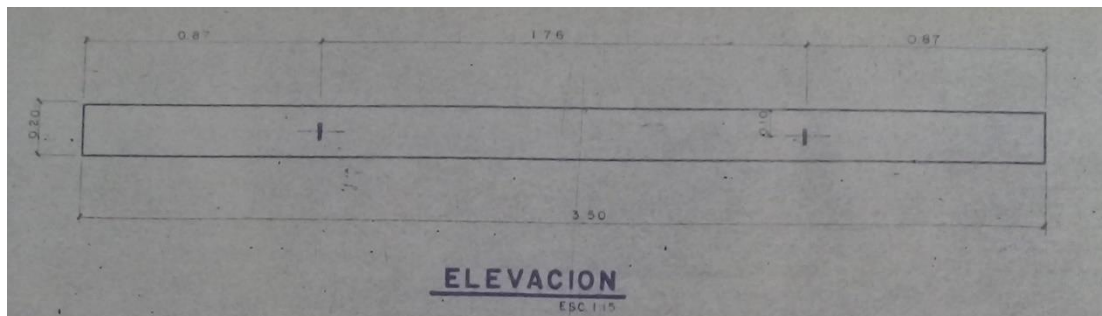


Figura 2.8 losas de tacón. (ET-61-01) y (ET-61-02)

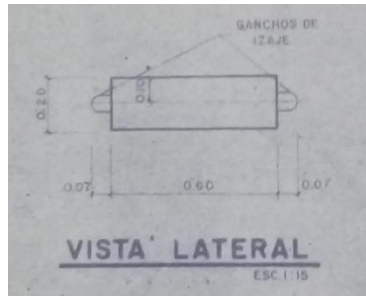


Figura 2.9 Losas de tacón de apoyo (ET-61-01) y (ET-61-02)(Ivasenko 1975)

Espesor=20 cm

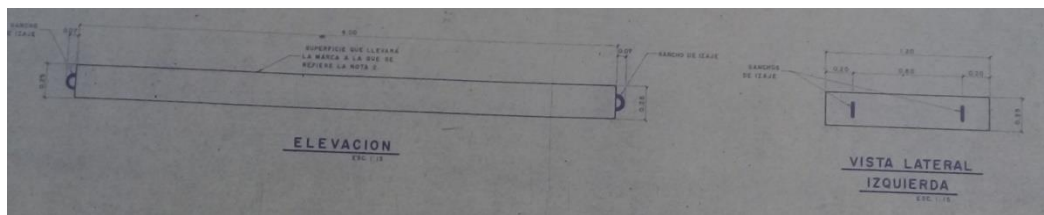


Figura 2.10 Losas interiores. (ET-62-01)

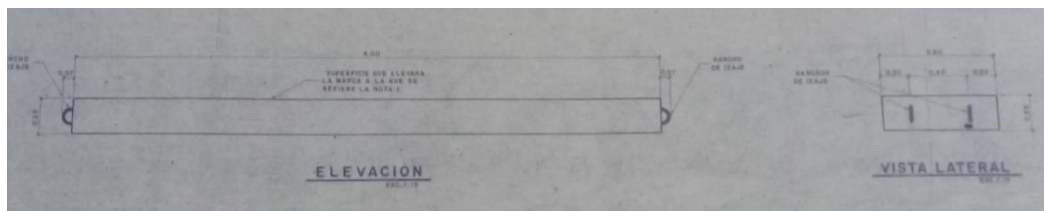


Figura 2.11 Losas interiores (ET-62-01) y (ET-62-02)(Ivasenko 1975)

Espesor =20 cm

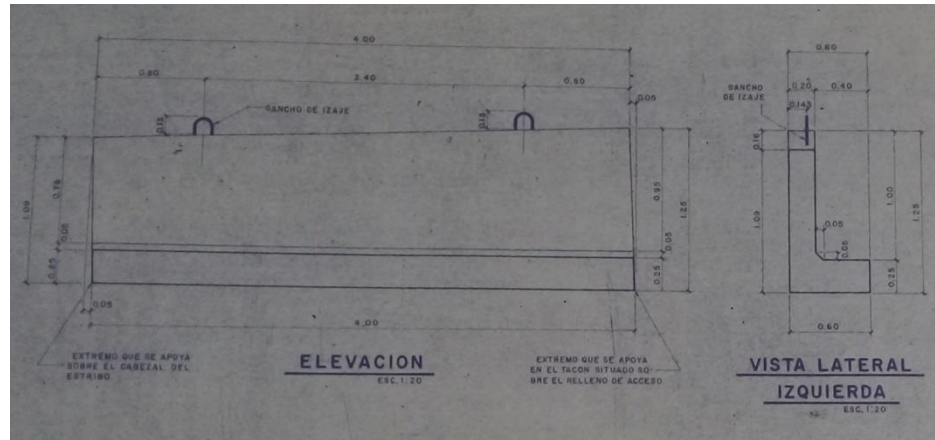


Figura 2.12 Losas exteriores (ET-62-03) y (ET-62-04)(Ivasenko 1975)

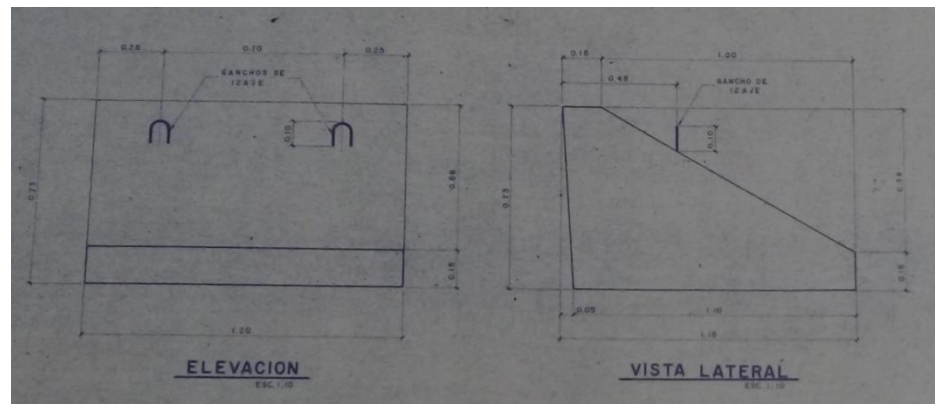


Figura 2.13 Piezas de bridas (ET-63-01)(Ivasenko 1975)

2.1.4 Estado de deterioro que presenta el puente.

Después de varios años de explotación se presentó en el año 2001 una propuesta para la reparación de dicho puente debido al deterioro que ya presentaba. En la memoria descriptiva del proyecto de reparación presentaba el defectado realizado donde se destacaron los siguientes problemas según (Armas and Glez 2001):

Juntas de dilatación del puente en mal estado.

El estribo lado Varadero está socavado y ha perdido el material de relleno producto al escurrimiento superficial de las aguas provocadas por las lluvias.

Pérdida del material de relleno debido a que no fueron cerrados los estribos durante la ejecución.

Se colocaron 3 tubos galvanizados de 4 pulgadas en el paseo y al no compactar el material de relleno que se utilizó para cubrir las tuberías este se ha comenzado a socavar.

Para su reparación en (Armas and Glez 2001) se puntualizaron las siguientes recomendaciones:

Limpieza del lugar y eliminación de los vertederos existentes en el área del puente.

Contempla el acarreo, cargue y transportación de todos los vertederos al lugar de depósito de escombros.

Solución de los estribos.

Colocar el rajón y el hormigón por capas (17.5 MPa) en estribo lado Varadero bajo la losa de aproche.

Cerrar los estribos con bloques (20cm) y aplicar repello grueso y fino.

Rellenar y compactar al 95% del Proctor Standard con material de mejoramiento a ambos lados del aproche Varadero hasta lograr una superficie compacta con pendiente de 2% desde los pretiles hacia la cuneta.

Reencauzar el sentido de las cunetas a ambos lados del puente para evitar que continúen socavando el estribo reparado.

Reparación de las juntas de dilatación.

Demolición de la capa asfáltica (0.5m) a ambos lados de la junta.

Demolición de una franja de 1m con 14cm de espesor de la losa in-situ.

Elaboración y colocación de acero para refuerzo en guardacantos de la juntas.

Colocación del hormigón con aditivo acelerador de fraguado Sikament-100.

A pesar de la reparación de aquel entonces el estado actual del puente observado en la inspección visual realizada sigue siendo:

El nivel de socavación en el estribo lado Varadero y la pérdida del material de relleno en el mismo.

La acumulación de basura y escombros arrastrados por el agua superficiales producto de las lluvias que escurren por el mismo lado.

Deterioro y pérdida de material visible de la losa de aproche en el lado Varadero.



Figura 2.14 Puente Nuevo Buey-Vaca. Lateral Estribo lado Varadero.



Figura 2.15 Puente Buey-Vaca. Parte inferior del Estribo lado Varadero.

2.2 Descripción del Modelo:

2.2.1- Geometría y vínculos de los elementos:

Para la realización del modelo computacional en el Sap2000 se utilizaron para cada elemento las correspondientes medidas contempladas en las memorias descriptivas de los proyectos consultados como bibliografía así como en los planos existentes de los mismos.

Tabla 2.1 Dimensiones de las vigas y columnas.

Elementos	Apoyos	Sección (m)	Longitud
Vigas de cabezal	-	0.7*0.8	12
Vigas longitudinales	-	0.4*0.85	20
<i>Columnas de estribos</i>	#1 y #5	0.5*0.6	1.33
<i>Columnas de pilas</i>	#2	0.6*0.6	7.5
	#3		8.0
	#4		5.9

Las longitudes de las columnas fueron modeladas tomando como parte inferior de las mismas el suelo hasta su unión con las vigas de cabezal o sea la longitud asumida en el modelo es sólo la visible, sin tener en cuenta la zona cubierta por el terreno.

Todos los apoyos del suelo se asumieron como empotramientos teniendo en cuenta su cimentación mientras que los vínculos superiores según los propios datos del proyecto se tomaron como simple apoyo, es decir las vigas longitudinales que sostienen el tablero descansan simplemente apoyadas sobre los pórticos formados por 3 columnas y vigas de cabezal, abarcando 2 luces de 4.2m cada una.

2.2.2- Materiales:

Anteriormente fue definido en la descripción del proyecto como material utilizado para la elaboración de los elementos del puente un hormigón armado con una resistencia a compresión de 25 MPa y acero A-30 siendo este el que se define en el Catálogo de Elementos prefabricados y los planos del proyecto, estos mismo fueron tomados para la concepción del modelo.

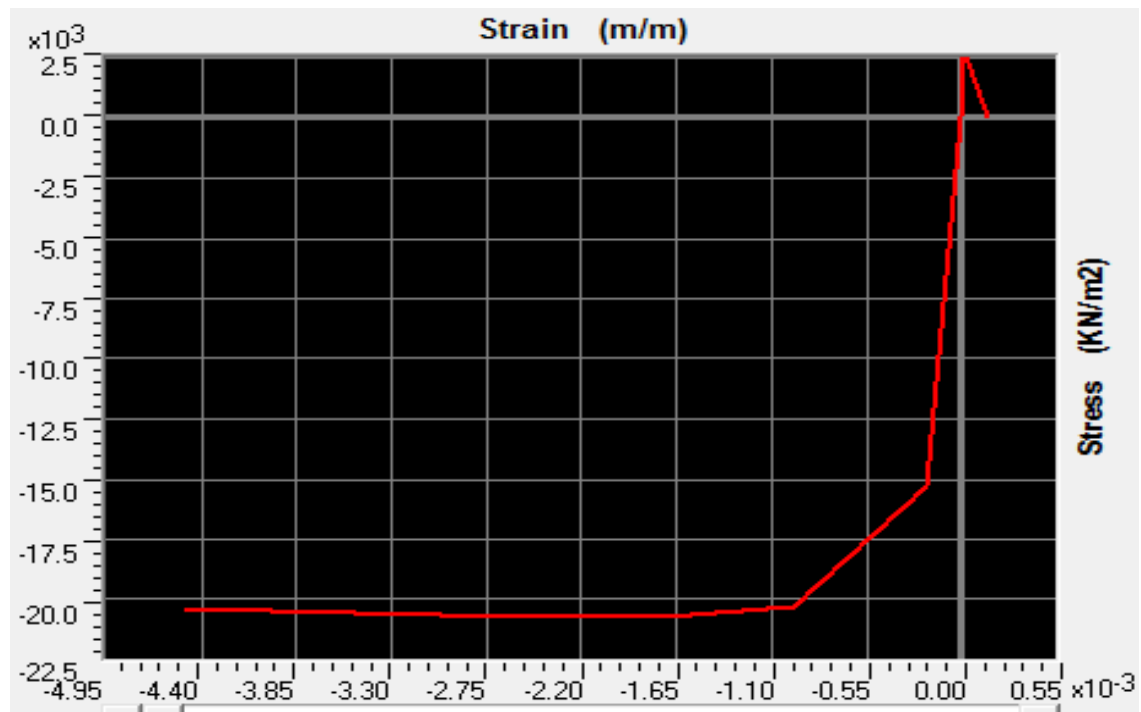


Figura 2.17 Imagen del grafico de la curva de comportamiento del Hormigón Armado.

2.2.3- Cargas actuantes:

A partir de lo planteado en (NC733 2009) las cargas que tendrán que considerarse en las combinaciones de este proyecto serán las siguientes:

2.2.3.1- Peso propio según los materiales de la estructura y sus accesorios:

El peso de los elementos de las estructuras se calcula a partir de los volúmenes de acuerdo a las dimensiones del proyecto en función de los pesos volumétricos componentes en correspondencia. En el caso de los accesorios tales como: rellenos, pavimentos, contenes, aceras, pretilas, juntas, tuberías, cables, postes, luminarias, se deben determinar en cada caso de acuerdo a la clase, tipo y material del mismo. (NC733 2009).

En las tablas correspondientes a las (NC733 2009) o (NC283 2003) se definen los siguientes datos:

Tabla 2.2 Pesos específicos de los materiales

<i>Materiales utilizados</i>	<i>Pesos Volumétricos KN/m³</i>
<i>Hormigón Armado compactación normal (agregados normales)</i>	25
<i>Hormigón Asfáltico</i>	23
<i>Hormigón Armado compactación mecánica (agregados normales)</i>	24

Fuente: (NC283 2003). Densidad de Materiales Naturales, Artificiales y de Elementos de Construcción como carga de Diseño.

En función de los datos se calcula el peso propio en KN/m² de cada elemento según sus dimensiones y material utilizando la siguiente fórmula:

$P = Y_m \cdot E$ donde:

Y_m : peso volumétrico característico del material.

E : espesor que presenta el elemento.

Tabla 2.3 Peso propio de los elementos del tablero

<i>Elemento</i>	<i>Cantidad (u)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>Peso volumétrico KN/m³</i>	<i>Peso Propio del elemento KN/m²</i>
<i>Barandas</i>	2	0.3	24	14.4
<i>Acera</i>	2	0.10	24	4.8
<i>Capa de rodadura.</i>	1	0.08	23	1.84
<i>Total</i>				21.04

2.2.3.2- Cargas accidentales móviles: para estas cargas en los puentes de autopistas, carreteras y los urbanos se debe realizar el diseño con los vehículos MS-32 y NK-80 (NC733 2009); teniendo en cuenta las características del puente en cuestión y considerando que no tiene fines militares a menos que se presente una situación excepcional es razonable emplear para su análisis de cargas el vehículo MS-32.

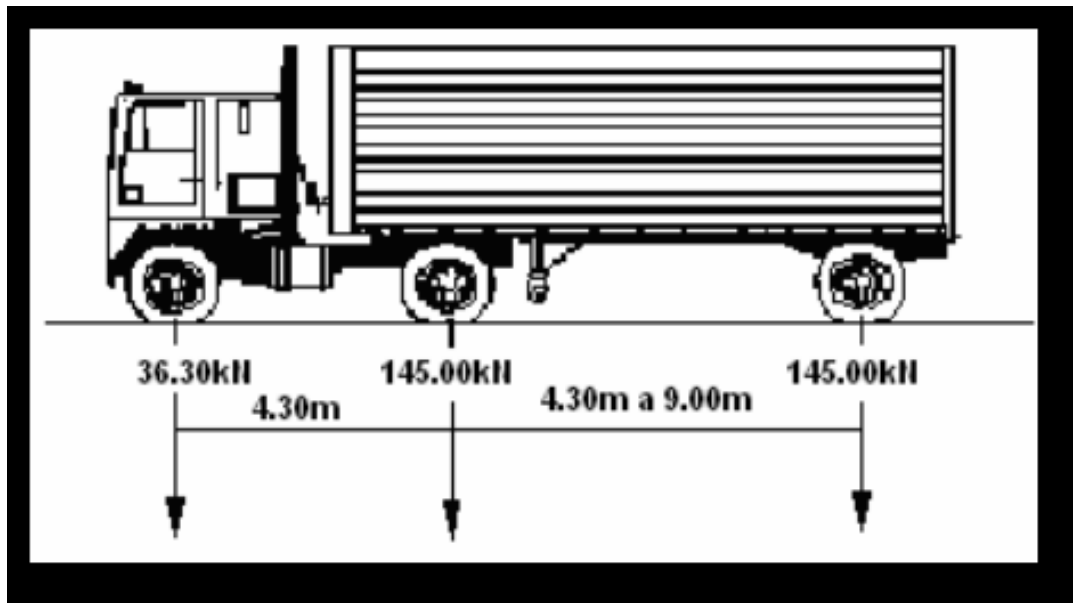


Figura 2.19 Dimensiones longitudinales del Vehículo MS-32(NC733 2009)

Tabla 2.4 Características del vehículo de diseño MS-32

NO.	Características principales	Unidad de medida	de MS-32
1	Peso del vehículo	KN	326.30
2	Eje delantero	KN	36.30
	Eje tándem intermedio	KN	145.00

	<i>Eje tándem trasero.</i>	KN	145.00
3	<i>Ancho del neumático</i> <i>Delantero</i> <i>Trasero</i>	m m	0.25 0.50
4	<i>Longitud del área de contacto del neumático con el pavimento.</i>	m	0.20
5	<i>Distancia entre ejes</i> <i>Delantero- intermedio</i> <i>Intermedio- trasero</i>	m m	4.30 Variable
6	<i>Ancho nominal del vehículo</i>	m	3.00
7	<i>Distancia entre ejes de ruedas transversalmente</i>	m	1.80

NOTA: se considera un camión tractor con semirremolque.

A partir de la recopilación de todos los datos mostrados anteriormente los cuales son introducidos en el software SAP 2000 se realiza una modelación del puente y se observa el comportamiento del mismo ante las condiciones y cargas que se le imponen.

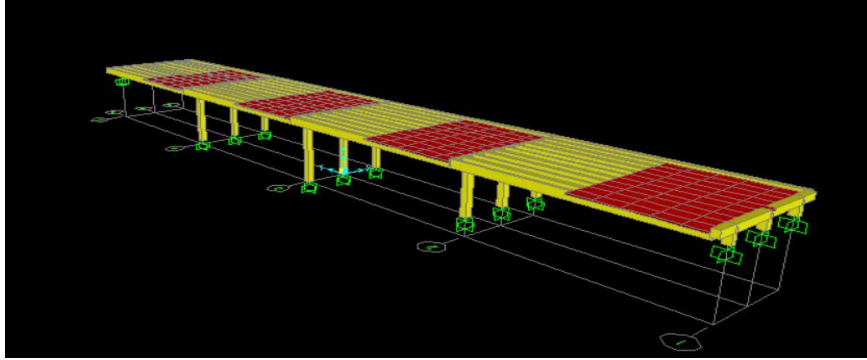


Figura 2.20 Imagen del Modelo del puente Buey Vaca en el software SAP2000.

2.2.4 Estados de carga:

Para el análisis de cargas se elaboraron varios modelos en los que se somete al puente a distintos esfuerzos de la carga móvil, en ellos se varía las posiciones, cantidades y velocidades de los vehículos. Estos modelos tienen cuatro variantes en las cuales se muestran a los vehículos a diferentes velocidades.

Tabla de velocidades para la serie de modelos tomando como velocidad máxima 70 Km/h:

Tabla2.5 Velocidades de los vehículos MS-32 en el modelo

<i>No. de Modelo</i>	<i>%</i>	<i>Velocidad (km/h)</i>
1	25	17.5
2	50	35
3	75	52.5
4	100	70

1era serie de modelos: El primer modelo concebido proyecta dos vehículos de diseño que se trasladan sobre el puente por carriles distintos pero en igual dirección, velocidad y posición en función del tiempo.

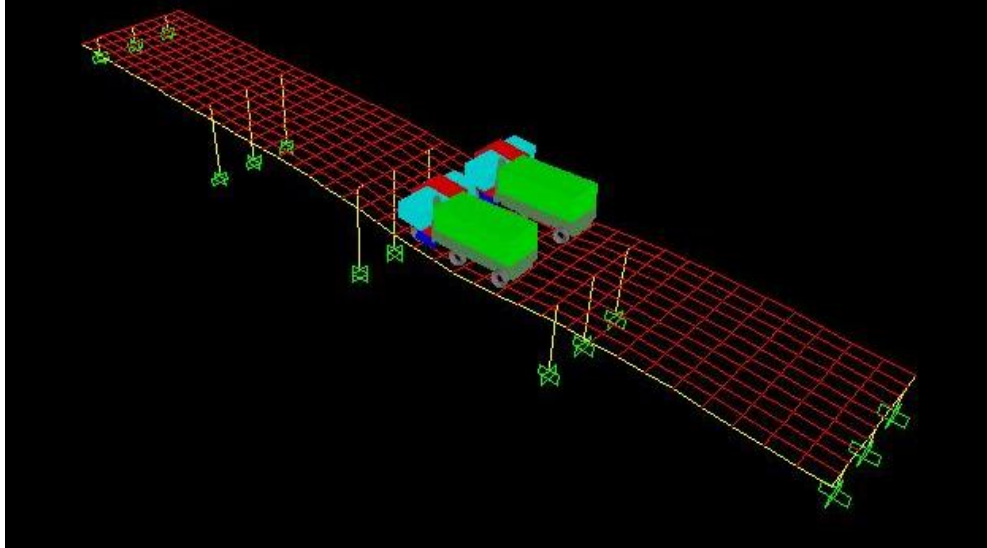


Figura 2.21 Imagen de la primera serie de modelos de cargas móviles. SAP2000.

2da serie de modelos: Luego fueron elaborados otra serie de modelos en los que se observa los mismos vehículos mostrados anteriormente pero esta vez ocupando una posición distinta sobre el puente aunque mantienen la misma velocidad entre ellos.

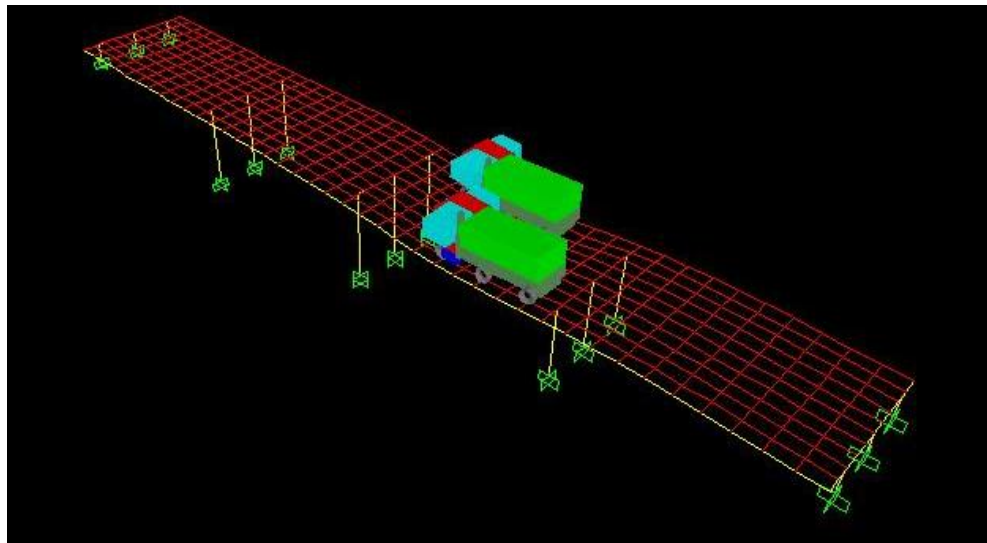


Figura 2.22 Imagen de la segunda serie de modelos de cargas móviles. SAP2000

3ra serie de modelos: En esta se muestran dos pares de vehículos trasladándose en la misma dirección y a una misma velocidad. Al igual que en los modelos anteriores se realizan una serie de cambios en las velocidades de los mismos, dichas velocidades ya fueron establecidas anteriormente.

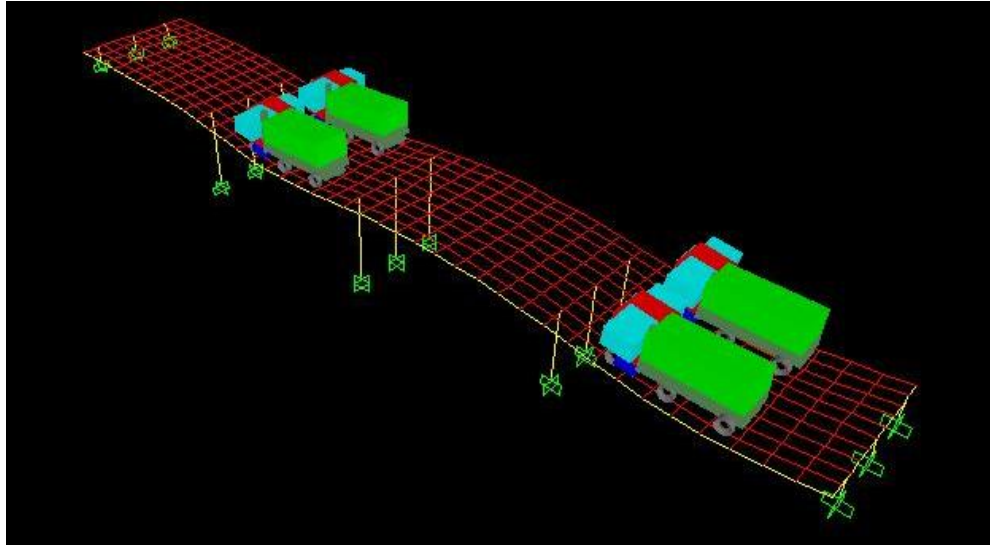


Figura 2.23 Imagen de la tercera serie de modelos de cargas móviles. SAP2000.

4ta serie de modelos: Por último se realizó una serie de modelos donde se muestran los cuatro vehículos anteriores transitando a la misma velocidad entre ellos pero con posiciones diferentes. Así mismo la serie se desarrolla a partir de la variación de las velocidades en cada modelo con los valores ya establecidos.

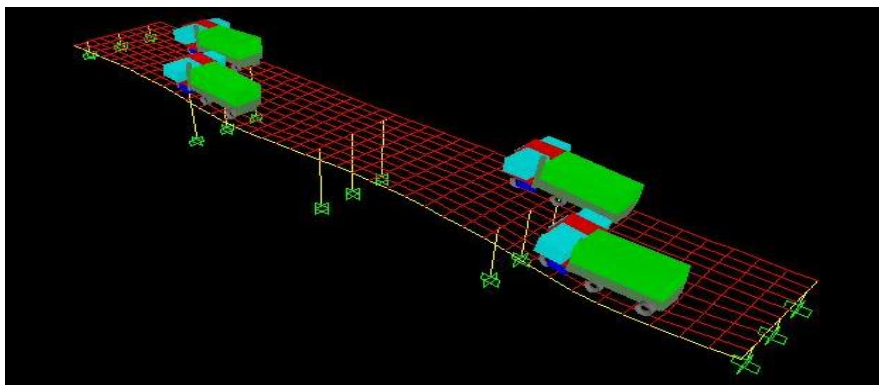


Figura 2.24 Imagen de la cuarta serie de modelos de cargas móviles.

2.3 Conclusiones Parciales:

El puente de Buey Vaca ubicado en la carretera Matanzas-Canímar fue un proyecto concebido y ejecutado en la década de 1990 como parte de la extensión de la Vía Blanca. Está constituido por elementos de hormigón prefabricado pertenecientes al Catálogo de Elementos prefabricado para puentes de carretera del sistema soviético. Aunque su proyecto original tuvo variaciones consta de una longitud de 80 m salvada por 4 luces con 11 vigas longitudinales de 20 m cada una, ubicadas a lo ancho del tablero a una distancia de 1.2 m entre ellas, dicho tablero cuenta con un ancho de 12.39 m y está formado además por una capa de rodadura de 0.08m.

Para la realización del modelo en el SAP2000 de este puente se usaron las medidas definidas en el proyecto sin violar ningún dato previamente establecido. Se realizó una evaluación del estado actual del puente mediante una inspección visual llegando a la conclusión de que es necesario un rápido mantenimiento debido a los problemas de socavación por el escurrimiento de las aguas que presenta la estructura, que aunque no es el único padecimiento observado si se puede asumir que es el más grave. Para el establecimiento de las cargas actuantes se tomaron los valores reales de las densidades y dimensiones de sus elementos, el vehículo de diseño correspondiente (MS-32) y se sometió a pruebas de carga en distintas circunstancias para poder tener mayor conocimiento de las reacciones en la estructura.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE LA ESTRUCTURA Y SU DESEMPEÑO ANTE LAS CARGAS IMPUESTAS.

3.1- Análisis de los resultados obtenidos en los modelos del Puente Nuevo de Buey Vaca.

Una vez confeccionados los modelos computacionales se pueden obtener los resultados que permiten conocer el comportamiento real de la estructura ante las cargas que le fueron impuestas. Se toman en cuenta los resultados de los diagramas de las Deformaciones máximas, los momentos máximos en las vigas, los momentos máximos en la losa del tablero, así como los valores de momentos flectores y de fuerza axial en las columnas.

3.1.1- Deformación.

Al analizar el resultado de los diagramas de Deformaciones en los modelos computacionales como resultado de los diferentes escalones de carga a los que fue sometida la estructura, es notable la similitud existente a simple vista entre los mismos, mostrando una mayor flecha en las vigas de los extremos y ocurriendo las mismas en el segundo 1 y el segundo 10 respectivamente.

El valor de esta deformación máxima según el análisis realizado de los datos por el *software* es de 0.15048 cm.

A pesar de que en cada uno de los modelos se varía el número de vehículos que transitan por el puente, en cada carril solo puede pasar un vehículo a la vez, o sea, aunque por el puente estén transitando 4 vehículos de diseño en un intervalo de tiempo de 10 seg, solamente uno de ellos provoca la deformación máxima al tiempo que se sitúa en la posición más desfavorable. Al mismo tiempo se observa que la velocidad, al menos en el rango permisible no influye en la deformación.

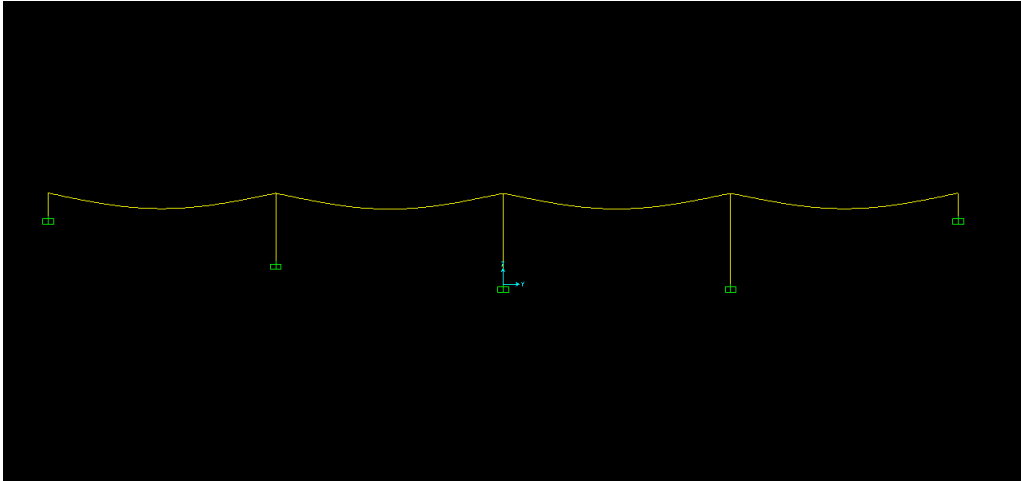


Figura 3.1 diagrama de deformaciones de los modelos computacionales del Puente Nuevo de Buey Vaca. Vista Plano YZ.

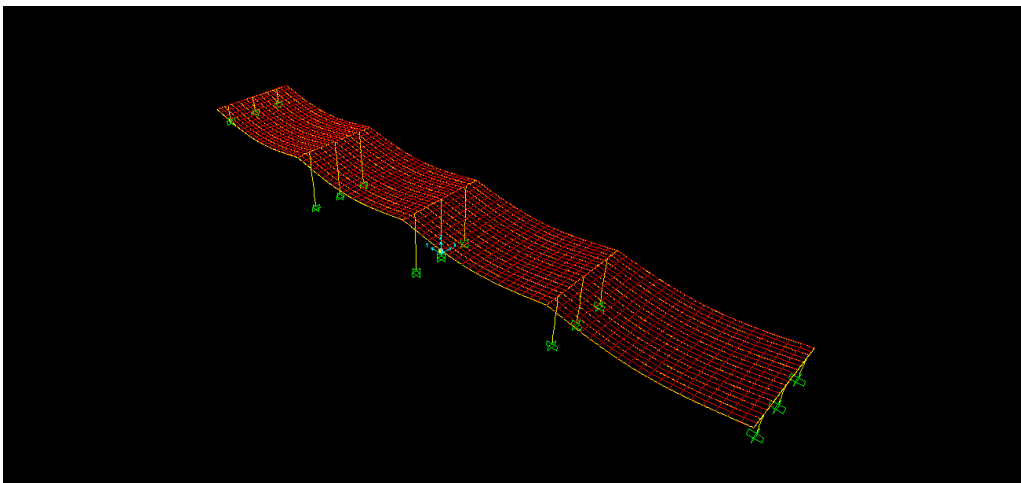


Figura 3.1 Diagrama de deformaciones de los modelos computacionales del Puente Nuevo de Buey Vaca. Vista 3D.

3.1.2- Momentos Flectores.

Los resultados de los Momentos los elementos Vigas y Losa del puente fueron similares a los obtenidos en el análisis de las Deformaciones. A pesar de la variación de número de vehículos y velocidades en cada modelo, los valores de momento para estos elementos fueron los mismos debido a que el número o cantidad de vehículos no influye, sólo el que se encuentre sobre la posición más desfavorable.

Tabla 3.1 Valores de Momentos máximos y mínimos.

<i>Elementos</i>	<i>Momentos positivos</i>	<i>Momentos Negativos</i>
<i>Vigas longitudinales</i>	<i>1937.73KNm</i>	<i>-</i>
<i>Vigas transversales (cabezales)</i>	<i>299.15KNm</i>	<i>-722.03KNm</i>

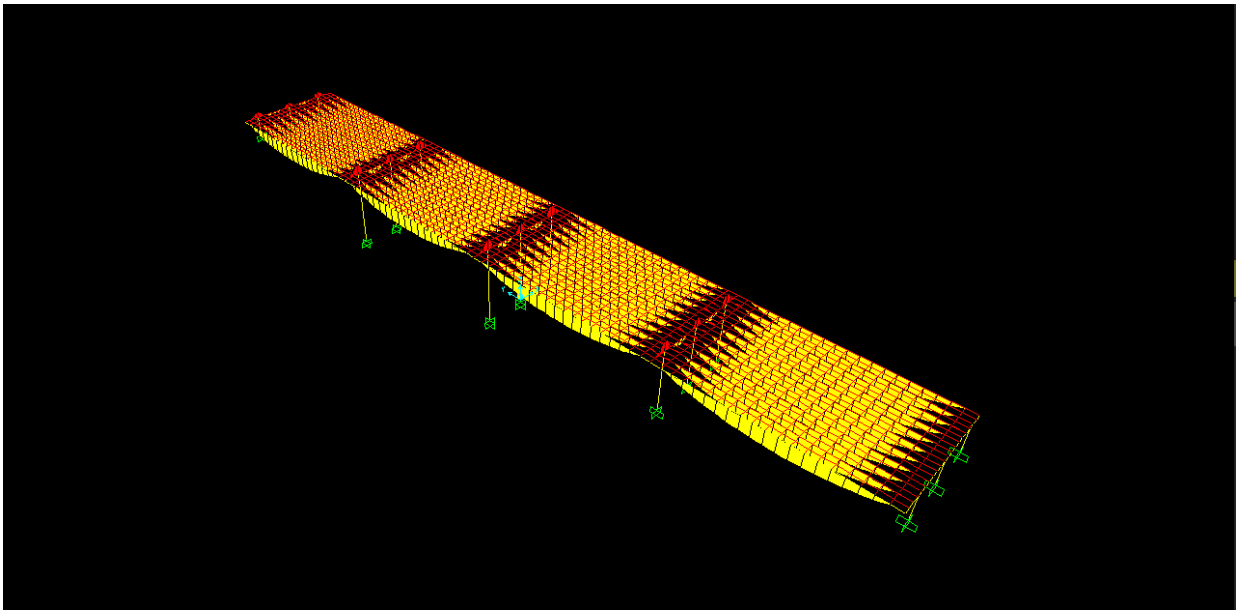


Figura 3.3 Diagrama de Momentos en las vigas longitudinales del Puente Nuevo de Buey Vaca. Vista 3D.

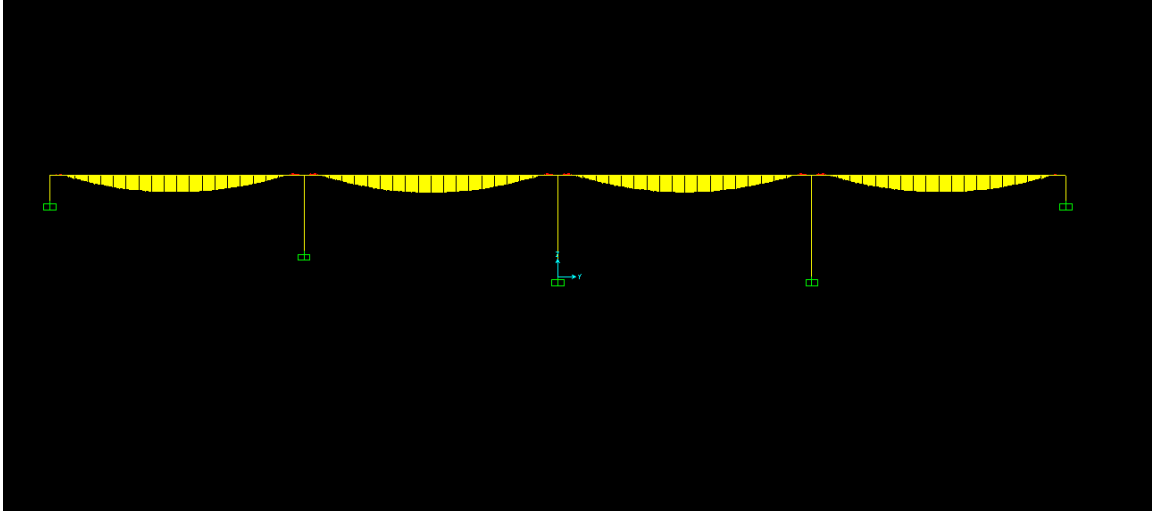


Figura 3.4 Diagrama de Momentos en las vigas longitudinales del Puente Nuevo de Buey Vaca. Vista Plano YZ.

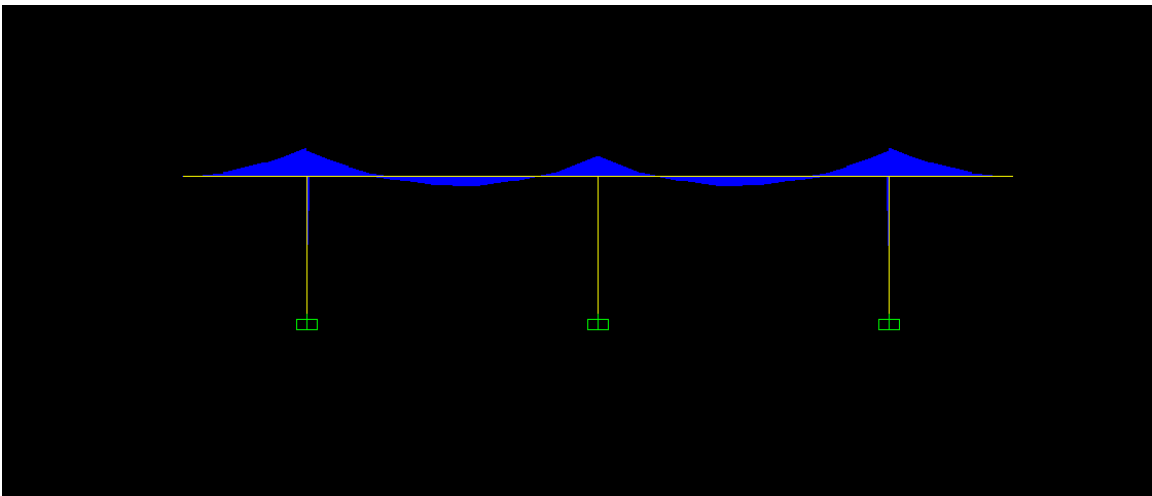


Figura 3.5 Diagrama de Momentos en las vigas transversales del Puente Nuevo de Buey Vaca. Vista Plano XZ.

En el caso de las losas que componen esta estructura, perfectamente podían obviarse en el modelo pues estructuras similares han demostrado su correcto funcionamiento en otras obras. En este caso la acción de las losas en la estructura real es solo la de transmitir las cargas hacia las vigas longitudinales que son los elementos que verdaderamente aportan la mayor resistencia estructural.

Se decidió incorporar las losas en el modelo numérico para tener en cuenta directamente su aporte en las cargas muertas así como para asignar sobre ella el resto de las cargas, permanentes y móviles, pero los momentos que se generan en ellas son muy bajos, debido a que la longitud entre losas es apenas de 1,2 m, lo cual produce que su demanda sea mucho menor a su capacidad real de carga.

3.1.3- Momento flector y Fuerza Axial en las columnas.

Para cada columna de las pilas y los estribos existe un valor correspondiente de Momentos y Axial el cual no presenta variación entre cada modelo. A pesar de presentar diferencia de valores, el gráfico es igual para cada uno de los pórticos.

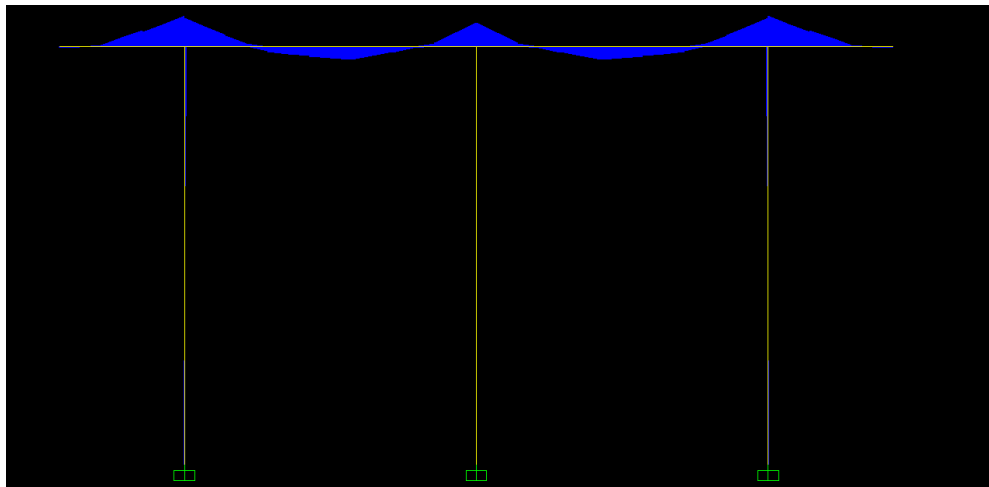


Figura 3.6 Gráfico de Momento Flector en las Columnas de la Pila. Vista Plano XZ.

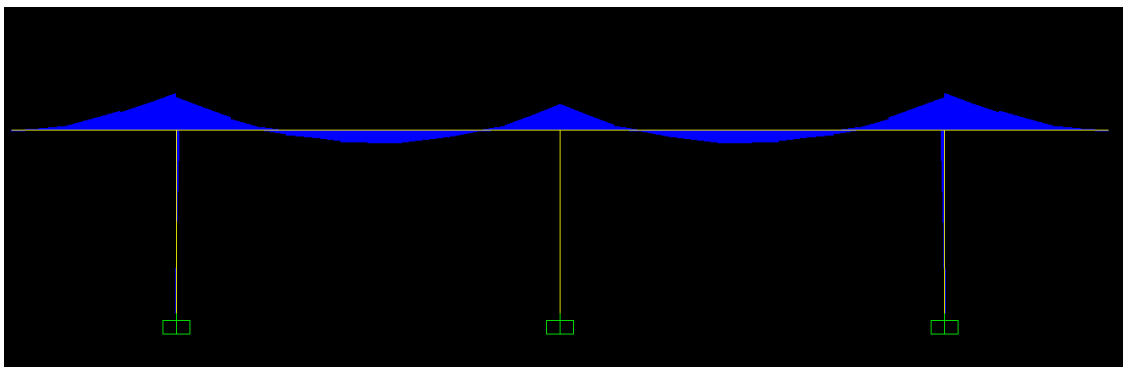


Figura 3.7 Gráfico de Momento flector en las columnas de los estribos. Vista Plano XZ.

Los valores del Momento flector en estos gráficos son prácticamente imperceptibles debido a que son realmente pequeños en comparación con los que presentan las vigas.

Estos valores serán propiamente mostrados en las tablas donde también serán expuestos los valores de Axial de las columnas.

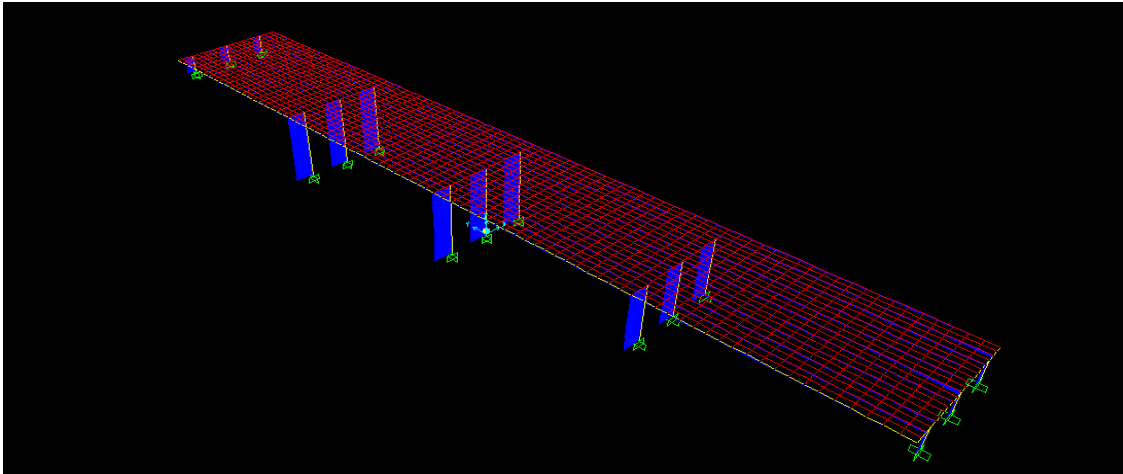


Figura 3.8 Gráfico de Fuerza Axial en las columnas del Puente de Buey Vaca. Vista 3D.

A continuación se muestran los valores de Momentos y Axial de las columnas correspondientes a las pilas y estribos.

Tabla 3.2 Momentos y Axial de las Columnas de las Pilas.

<i>No. columnas</i>	<i>Axial</i>	<i>M3</i>
<i>4</i>	<i>-3909.49</i>	<i>45.5581</i>
<i>4</i>	<i>-3909.49</i>	<i>-92.636</i>
<i>5</i>	<i>-3754.34</i>	<i>0</i>
<i>6</i>	<i>-3909.49</i>	<i>92.636</i>
<i>6</i>	<i>-3909.49</i>	<i>-45.5581</i>
<i>7</i>	<i>-3965.14</i>	<i>49.0853</i>
<i>7</i>	<i>-3965.14</i>	<i>-99.7734</i>
<i>8</i>	<i>-3803.91</i>	<i>0</i>
<i>9</i>	<i>-3965.14</i>	<i>99.7734</i>
<i>9</i>	<i>-3965.14</i>	<i>-49.0853</i>
<i>10</i>	<i>-3901.12</i>	<i>54.5046</i>
<i>10</i>	<i>-3901.12</i>	<i>-112.196</i>
<i>11</i>	<i>-3756.36</i>	<i>0</i>

12	-3901.12	112.1957
12	-3901.12	-54.0853

Tabla 3.3 Momento y Axial de las columnas de los estribos.

<i>No. columnas</i>	<i>Axial</i>	<i>M3</i>
1	-1908.22	37.41
1	1908.22	-88.65
2	1836.547	0
3	-1908.22	88.65
3	-1908.22	-37.41
13	-1909.8	37.466
13	-1909.8	-88.7746
14	-1837.7	0
15	-1909.8	88.7746
15	-1909.8	-37.466

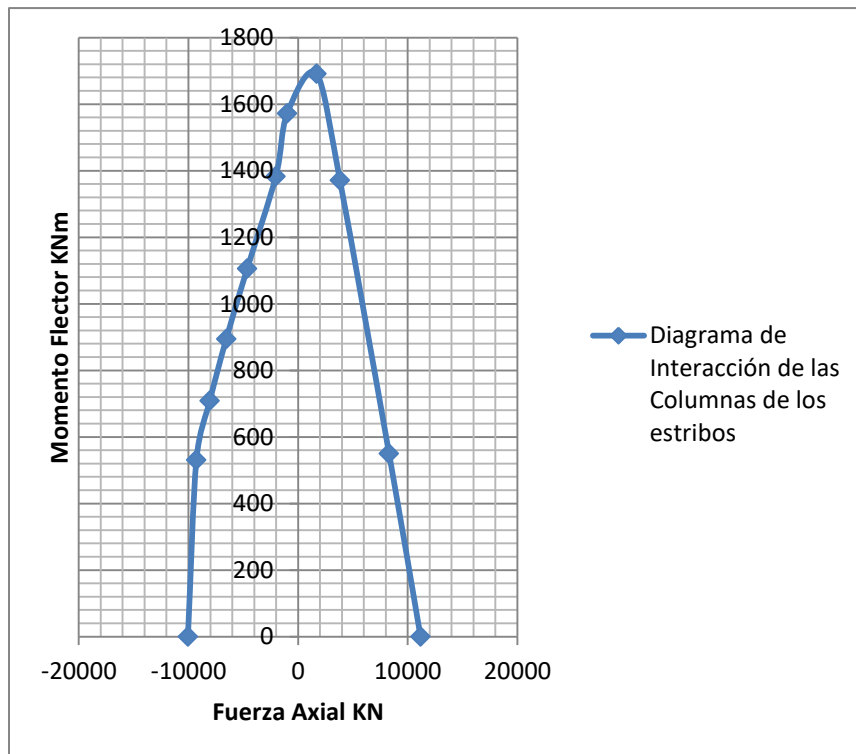
3.2- Comparación de los resultados obtenidos en el Modelo Computacional con los valores permisibles de la estructura.

3.2.1- Diagrama de Interacción de las Columnas del Puente Buey Vaca.

A continuación se muestran los valores de las combinaciones más críticas que pueden resistir las columnas de los estribos y las pilas respectivamente según sus características. Estos valores deben ser comparados con los valores que actúan realmente sobre la estructura para comprobar que puede resistir las fuerzas que actualmente actúan sobre el puente.

Tabla 3.4 Combinaciones de valores de Momento y Axial para las columnas.

Estribos		Pilas	
Axial	M3	Axial	M3
-10047.6	0	-5918.81	0
-9271.94	531.2719	-5918.81	297.8103
-8050.64	708.2709	-5330.44	443.001
-6549.04	894.6829	-4484.49	564.8594
-4641.77	1105.57	-3543.65	662.5136
-2033.17	1382.592	-2457.1	747.9027
-989.974	1571.887	-2093.7	838.7119
1683.976	1691.244	-1344.99	904.1726
3816.92	1371.213	-296.155	729.6704
8298.99	550.1814	1138.389	404.5612
11169.51	0	2757.725	0



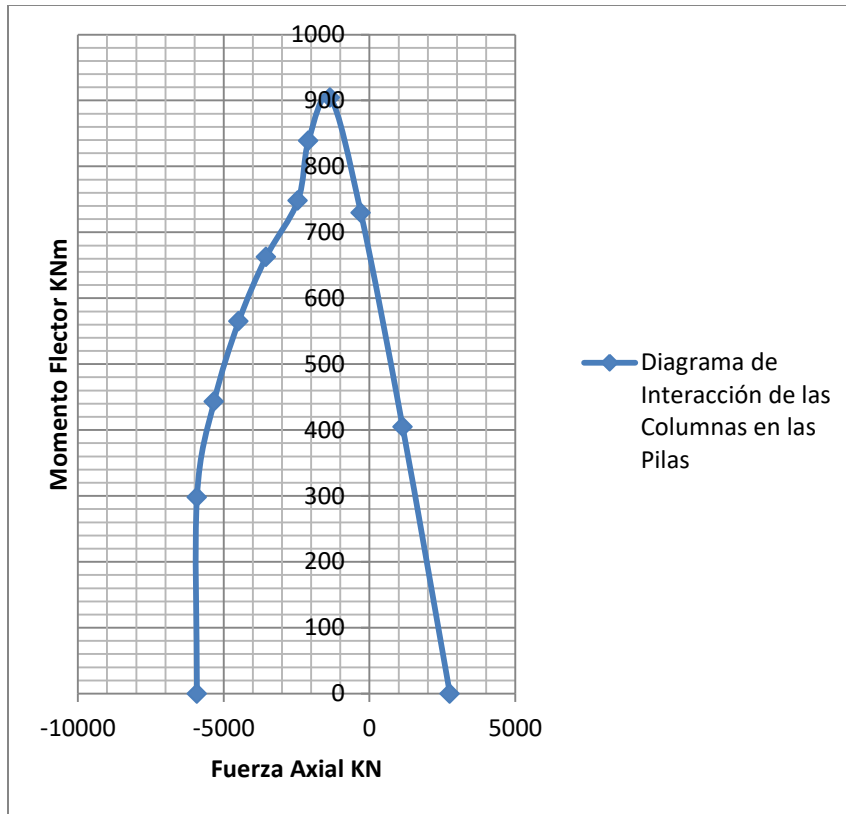


Figura 3.9 Diagramas de Interacción de las Columnas.

Para un análisis final de las fuerzas que actúan sobre las columnas, es necesario colocar los datos anteriores en un solo diagrama de interacción, para conocer si la curva que forman las combinaciones de momento flector y fuerza axial que puede soportar la estructura es mayor que la curva de las combinaciones de carga reales actualmente.

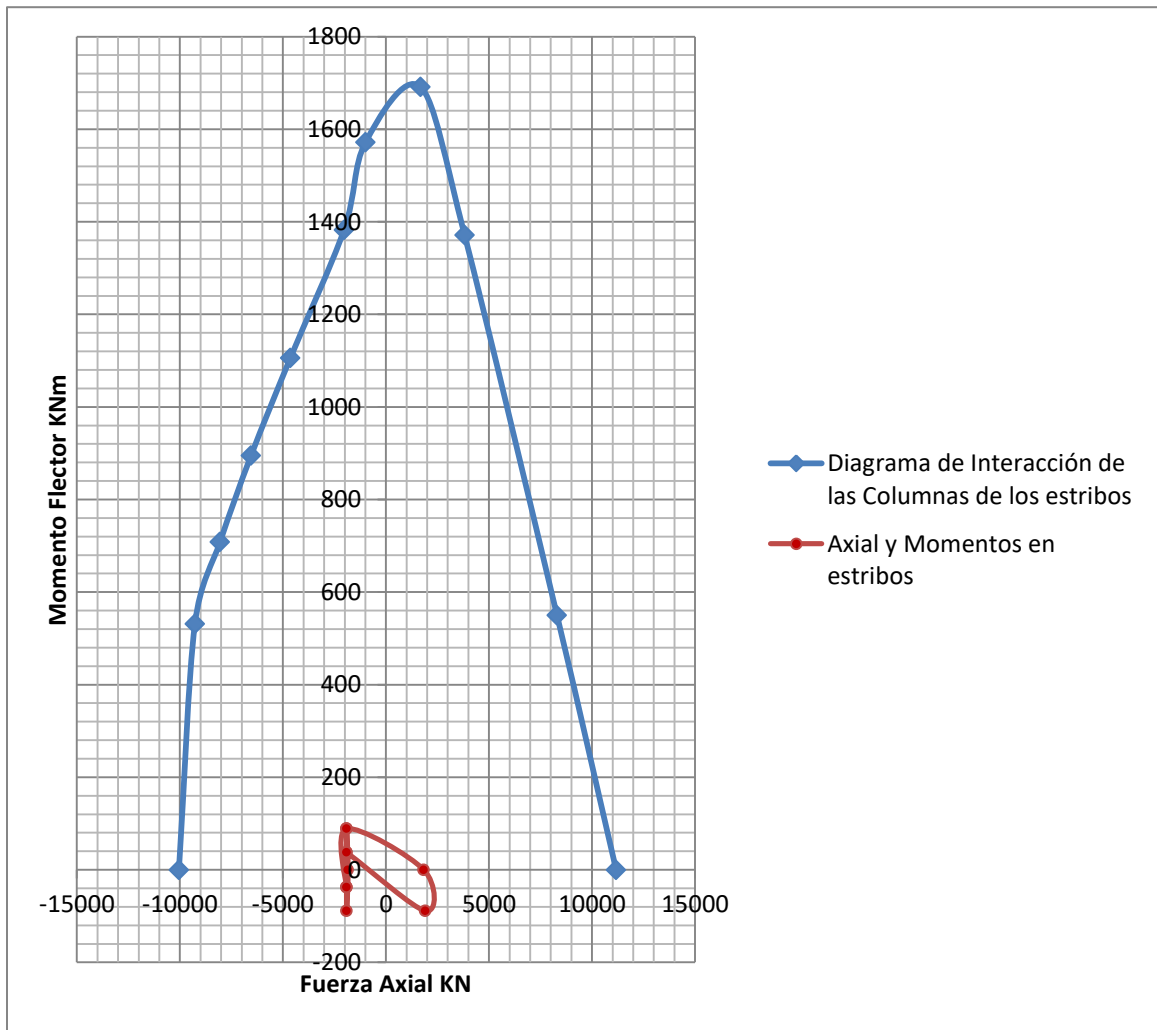


Figura 3.10 Diagrama de Interacción de las columnas de los Estribos

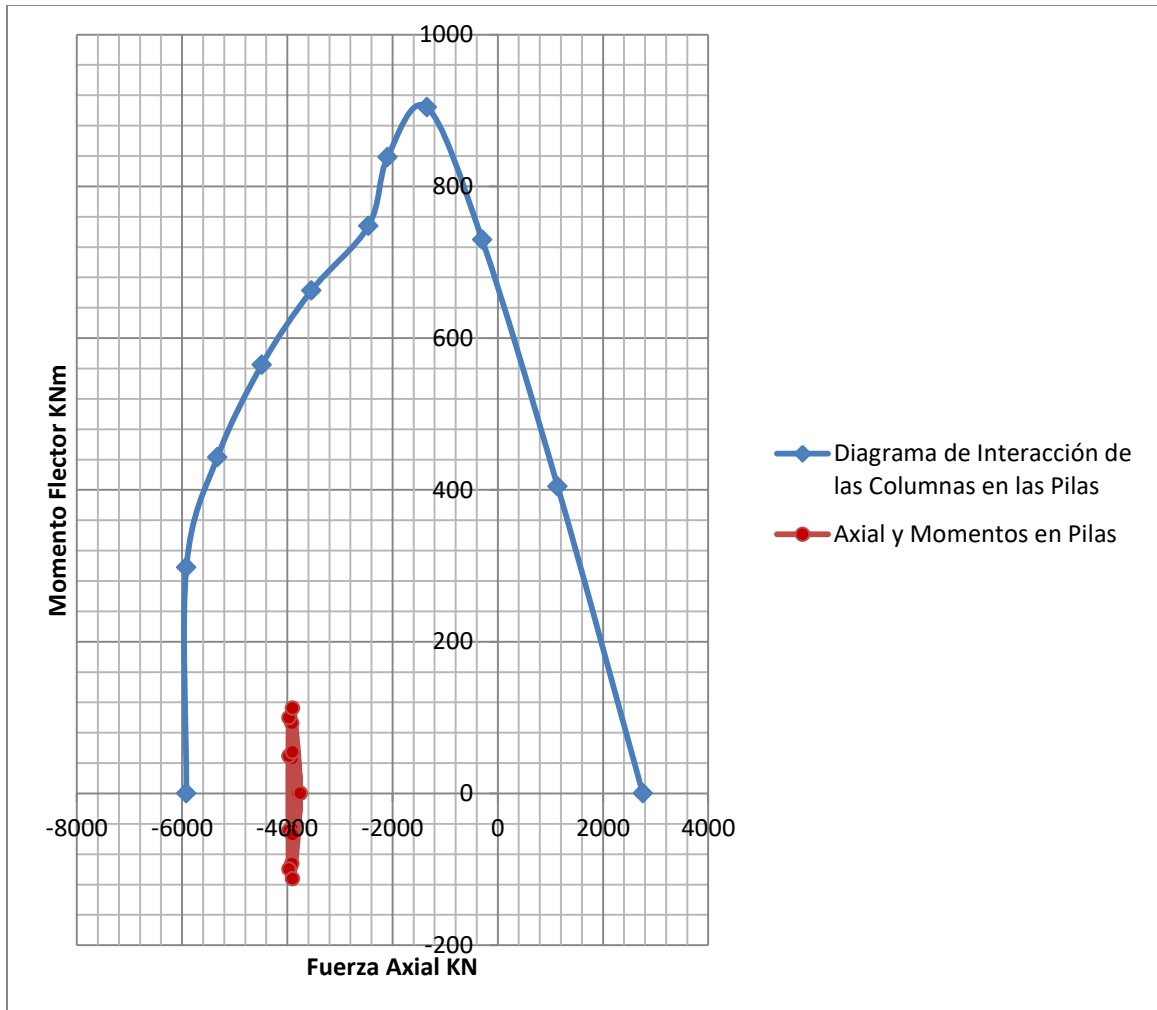


Figura 3.11 Diagrama de Interacción de las columnas de las Pilas.

3.2.2- Cálculo de Momento Nominal en las Vigas.

Al igual que el análisis anterior que fue realizado con las columnas, es necesario conocer el Momento Nominal de las vigas y la losa, o sea el momento que puede resistir estos elementos y así compararlos con los valores que actúan hoy sobre ellos para comprobar el estado del puente.

En el caso de las vigas longitudinales y transversales es posible calcular el Momento Nominal a partir de la siguiente fórmula:

$$M_n(\text{viga}) = 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b \cdot (d - a/2) + f_y \cdot A'_s \cdot (d - d_s)$$

Donde:

$$a = f_y \cdot (A_s - A'_s) / 0.85 \cdot b \cdot f'_c$$

Con:

<i>Abreviatura</i>	<i>Valor en las vigas transversales</i>	<i>Valor en las vigas longitudinales</i>
<i>f'c</i>	<i>25MPa</i>	<i>25MPa</i>
<i>f_y</i>	<i>300MPa</i>	<i>300MPa</i>
<i>A' s</i>	<i>28.14cm²</i>	<i>69.53cm²</i>
<i>A_s</i>	<i>56.16cm²</i>	<i>95.48cm²</i>
<i>d_s</i>	<i>7.5cm</i>	<i>7cm</i>
<i>d</i>	<i>72.5cm</i>	<i>78cm</i>
<i>a</i>	<i>5.65cm</i>	<i>9.16cm</i>

Por tanto:

$$M_n(\text{viga transversal}) = 113\,430.48 \text{ KNcm} = 1\,134.305 \text{ KNm.}$$

$$M_n(\text{viga longitudinal}) = 205\,263.712 \text{ KNcm} = 2\,052.637 \text{ KNm.}$$

3.2.3- Comparación de los resultados.

Una vez que se han obtenido todos los resultados de las fuerzas actuantes a partir del software y se han calculado el de los valores permisibles de los elementos de la estructura tales como vigas, columnas y losa, debemos compararlos para la correcta evaluación del estado del puente.

Si los valores actuantes son menores que los permisibles entonces se puede decir que la estructura resiste las cargas bajo las que trabaja actualmente y no debe presentar problemas para soportarlas.

Tabla 3.5 Comparación de Momentos actuantes y permisibles de las vigas y losa.

<i>Elementos</i>	<i>Momentos (KNm)</i>	
	<i>Actuantes</i>	<i>Nominales</i>
<i>Vigas Transversales</i>	<i>722.03</i>	<i>1 134.305</i>
<i>Vigas Long.</i>	<i>1937.73</i>	<i>2 052.6</i>

Como se puede observar en cada uno de los análisis de los elementos que se tuvieron en cuenta la capacidad nominal de estos está ampliamente por encima de la demanda estructural que producen las cargas. Esto garantiza el correcto funcionamiento del puente e incluso permitiría un incremento de carga, no sin antes analizar cuál sería el límite superior de carga que puede aplicarse. En el caso de las vigas transversales están trabajando a un 64% de su capacidad máxima y las vigas longitudinales a un 94% de las mismas.

3.3 Conclusiones parciales

- El análisis de las solicitaciones que se generan en los elementos, vigas longitudinales, vigas transversales y columnas son considerablemente menores que las capacidades nominales de las secciones transversales de estos elementos.

- La influencia de la velocidad de circulación en el cálculo de las solicitaciones de diseño para esta estructura es despreciable, pues un aumento de la velocidad de circulación no conlleva a un aumento de las solicitaciones en los elementos.

CONCLUSIONES

Una vez obtenidos todos los resultados de la investigación podemos concluir que:

- 1- La modelación estructural es el proceso mediante el cual se representa la conducta real de la estructura, es donde se trata de definir las dimensiones de los componentes estructurales con una precisión adecuada.
- 2- Para realizar el análisis general de un puente es necesario seccionarlo y modelar sus elementos independientes. En el caso del Puente Nuevo de Buey Vaca se analiza teniendo en cuenta los elementos que componen el pórtico de la subestructura tales como columnas, vigas cabezales y vigas longitudinales además de la losa del tablero.
- 3- El puente Nuevo de Buey Vaca requiere actualmente acciones de mantenimiento solamente, no intervenciones constructivas que interesen su capacidad estructural.
- 4- La velocidad de los vehículos que transitan por el Puente Nuevo de Buey Vaca no influye en los valores de Momento que dicha carga pueda aportarle a la estructura, así como tampoco en la deformación que provoca. Al menos esto ocurre así en el rango de la velocidad permisible, o sea velocidades menores a 70KM/h.
- 5- Los elementos por los que está compuesta la estructura no debe presentar dificultades para soportar las cargas a las que está sometida actualmente ya que los valores de las cargas permisibles son mayores que las actuantes.

RECOMENDACIONES

A partir de lo expuesto anteriormente se recomienda:

- 1- Ejecutar un proyecto de reparación del Puente Buey Vaca para corregir los deterioros que presenta.
- 2- Realizar el análisis de la capacidad de carga de todos los puentes de la ciudad para conocer el estado en el cual se encuentran estas estructuras actualmente y para soportar cargas futuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(2011). Manual de Carreteras del Paraguay, Ministerio de Obras Públicas y Comunicación.

Armas, N. d. and L. R. Glez (2001). "Proyecto de Reparación del Puente Buey Vaca Nuevo."

Arnal (2000). Lecciones de puentes. Caracas, Venezuela, Universidad Central de Venezuela.

Barreda, D. B. (2018). Comparación entre análisis en estructuras regulares apoyados en la NC46-2017.

Bermúdez, A. M. (2017). ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TENSO-DEFORMACIONAL DE LOS APROCHES DEL PUENTE DEL VIADUCTO DE MATANZAS, MEDIANTE MÉTODOS NUMÉRICOS.

CASTANEDA, C. Y. V. (2018). MODELACIÓN NUMÉRICA DE BASE PARA MAQUINARIA TIPO CUCHILLA DEL CENTRAL MARIO MUÑOZ.

E, T. G. V. (1987). "Puentes." Pueblo y Educación. II.

Flores, D. L., et al. (2009). "Como intervienen las fuerzas en la construcción de los puentes colgantes."

GARCÍA, I. J. (2016). Modelación numérica de pisos industriales en concreto rígido, Universidad de Matanzas sede Camilo Cienfuegos.

Glez, L. R. A. (1998). Experiencias y Métodos para la Conservación de Puentes de Carreteras en la República de Cuba. Matanzas, Cuba.

Gómez, J. D. (2015). "Puentes."

GÓMEZ, M. Á. (2012). "CAPITULO V. Modelación y Análisis Estructural de Edificios Altos. Diseño Estructural de Edificios Altos Tipo Torre Empleando Concreto de Alta Resistencia."

Guzmán, M. (2008). "Consideraciones de diseño en la infraestructura de puentes carreteras."

Hernández., P. and L. Domínguez (1990). "Proyecto Puente Buey Vaca."

Ibicenco, I. B. (1975). Catálogo de elementos prefabricados para puentes de carretera del sistema soviético. G. V. Nacional.

Martínez, J. C. (2004-2005). Estudio Aplicado de los costes de la prevención de Riesgos Laborales en la Construcción de Puentes de Hormigón. Tipología de Puentes. Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya.

NC46 (2017). "Construcciones sismorresistentes.Requisitos para diseño y construcción."

NC283 (2003). Densidad de Materiales Naturales, Artificiales y de Elementos de Construcción como carga de Diseño.

NC335 (2004). Inspección y Conservación de Puentes.

NC733 (2009). Carreteras. Puentes y Alcantarillas. Requisitos de diseño y Métodos de cálculo. Cuba.

Pérez, W. S. (2018). Modelación de las tensiones en las zonas cercanas a los ganchos de izares de las losas GP-IV.

Quintana, E. d. J. V. and G. A. Ayala. "CRITERIOS DE MODELACIÓN DE PUENTES DE CONCRETO REFORZADO CON FINES DE EVALUACIÓN POR DESEMPEÑO Y DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL."

Recarey (1999).

Romero., J. G. (2013). Determinación de la capacidad de carga para un puente en explotación.

Simanca, E. G. (2017). EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SERVICIO DE LOS PUENTES DE CARRETERA.

Villarino (2010). Puentes, Ingeniería Técnica de Topografía. España, Escuela Politécnica Superior de Ávila.