

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



**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DEL PUENTE
KM 2.151 DEL RAMAL DUBROCQ**

TRABAJO DE DIPLOMA EN INGENIERÍA CIVIL

Autor: Reynaldo Giraldez Toledo

Tutor: MSc. Ing. Alejandro Hernández Hernández

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

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

AGRADECIMIENTOS

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

A mi tutor y amigo Alejandro Hernández Hernández por todos los fines de semana de trabajo para lograr el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y compañeros que han estado siempre presente y brindado su apoyo, en especial a mi novia a quien considero mi mejor amiga.

A Roberto Roque Sierra quien me apoyo en todo momento.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

RESUMEN

El puente de ferrocarril sobre el río Yumurí correspondiente al ramal Dubrocq, sigue desempeñando un papel crucial en la urbe matancera, garantizando la comunicación ferroviaria del puerto con la región centro-oeste del territorio. En sus más de 100 años ha sufrido muchas intervenciones de mayor y menor grado y actualmente no se tiene certeza de la capacidad estructural del puente. Para este estudio se realiza la modelación estructural del puente y se analiza el efecto de las cargas móviles sobre la estructura, utilizando el software SAP 2000, teniendo en cuenta la velocidad del material móvil que por ahí transita y el resto de las cargas que actúan en la estructura; obteniendo como resultados que bajo los esquemas de carga propuestos, los elementos estructurales del puente trabajan alrededor del 50% de su capacidad estructural real y un incremento de la velocidad no afecta la respuesta de la estructura.

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

ABSTRACT

The railway bridge over the Yumurí River, corresponding to the Dubrocq branch, continues playing a crucial role in Matanzas city, guaranteeing rail communication between the port and the center-west region of the territory. In its more than 100 years it has undergone many interventions of greater and lesser degree and at present there is no certainty of the structural capacity of the bridge. For this study, the structural modeling of the bridge is performed and the effect of mobile loads on the structure is analyzed, using SAP 2000 software, taking into account the speed of the mobile material that passes through there and the rest of the loads that act in the structure; obtaining as a result that under the proposed shifting schemes, the structural elements of the bridge work around 50% of their real structural capacity and an increase in speed does not affect the response of the structure.

Keywords: Bridge; modeling; Mobile Uploads; structural capacity.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
Capítulo 1 Análisis de estado del arte de la modelación computacional y el análisis dinámico.....	6
1.1 Antecedentes del tema.....	6
1.2 Análisis dinámico.....	7
1.2.1 Vibraciones	8
1.2.2 Frecuencia natural.....	9
1.2.3 Resonancia.....	10
1.2.4 Cargas dinámicas	11
1.3 Cargas en puentes de ferrocarril.....	13
1.3.1 Carga de viento.....	13
1.3.2 Cargas sísmicas. NC 46:2017	14
1.3.3 Cargas de ferrocarril	16
1.4 Método de elementos finitos (MEF)	16
1.4.1 Sistemas discretos y sistemas continuos.....	16
1.4.2 Hipótesis de Discretización.	17
1.5 Modelación estructural.....	19
1.5.1 Ventajas y desventajas de la modelación computacional.....	20
1.6 Conclusiones Parciales.....	21
Capítulo 2 Modelación del Puente km 2.151 del Ramal Dubrocq	22
2.1 Geometría.....	22
2.2 Materiales.....	23
2.3 Secciones.....	24
2.4 Vínculos	27
2.5 Cargas.....	27
2.5.1 Prueba de carga.....	28
2.5.2 Cargas reales de circulación	29
2.6 Calibración.....	30
2.7 Estados de Cargas.....	30
2.8 Conclusiones Parciales.....	31
Capítulo 3 Análisis de los Resultados obtenidos de la modelación.....	32
3.1 Deformaciones de las cerchas a ambos lados del puente.....	32
3.1.1 Análisis de las deformaciones para la Carga Móvil	32
3.1.2 Análisis de las deformaciones para la Carga de Viento	32
3.1.3 Análisis Time History para las velocidades definidas en los estados de cargas.	33
3.2 Capacidad portante de los elementos estructurales.....	34
3.2.1 Capacidad portante de los elementos bajo la acción del Estado de Carga referente a Cargas Móviles.....	34
3.2.2 Capacidad portante de los elementos bajo la acción del Estado de Carga referente a la Acción de la Carga de Viento	36
3.2.3 Capacidad portante de los elementos, bajo la acción de los Estados de Cargas pertenecientes a los Análisis de Integración Directa, teniendo en cuenta las velocidades.....	37
3.3 Modos de Vibración.....	41

3.4 Conclusiones Parciales	44
Conclusiones	45
Recomendaciones	46
Referencias Bibliográficas	47

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Matanzas es también conocida como la ciudad de los puentes, se encuentra enmarcada entre los ríos Yumurí, San Juan y Canímar de ahí que cuente con alrededor de 30 puentes de los cuales 5 son centenarios.(González Arestuche and Recondo Pérez, 2009) Existe gran variedad entre ellos, con respecto a su uso, materiales y estructura; puentes vehiculares, de ferrocarril, de armaduras, de arcos y mixtos forman parte icónica de la Atenas de Cuba.

En la actualidad la ciudad cuenta con 5 puentes centenarios aún en explotación; estos son el puente General Lacroix Morlot construido en 1878, Calixto García 1897, puente giratorio sobre el río San Juan 1904, el puente del km 2.151 del ramal Dubrocq 1904 y Sánchez Figueras 1916. De ellos, dos destacan, por su importancia económica, el giratorio y el Dubrocq ambos inaugurados el día 8 de abril del año 1904, garantizando la comunicación ferroviaria del puerto con la región centro-oeste del territorio.

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

El puente del km 2.151 del ramal Dubrocq en sus más de 100 años ha sufrido muchas intervenciones de mayor y menor grado. En el año 2011 la estructura sufre un daño de gran magnitud y se ve sometida a una reparación capital, para aumentar su vida útil hasta que se lograra la construcción de un nuevo puente. Al evaluar el estado del puente se decidió otorgarle un período de 2 años. El mismo venció en el año 2014 por lo que se decide realizar un mantenimiento debido al grado de corrosión que presentaba y se determinó un período de seguridad estructural de 2 años, aunque los resultados de la prueba de carga denotan un agotamiento con respecto a la anterior.

En el año 2016 se realiza otra inspección y se determina que a pesar del poco tiempo transcurrido, la obra ya presenta afectaciones debido a la corrosión, y debido a esto se impone una disminución par la velocidad de circulación a 20 km/h. Bajo estas

condiciones el puente se considera apto para la circulación por un período de 2 años.(Pérez, 2018)

Al día de hoy ha caducado este período y no se tiene certeza de la capacidad estructural real. Es por esto que se plantea como **situación problémica** no existen estudios recientes que demuestren la capacidad portante del puente km 2.151 del ramal Dubrocq ante la acción de las cargas móviles.

Por tanto se plantea como **problema científico** que en las condiciones actuales del puente no se confirma su seguridad ni su funcionamiento en el futuro, por lo cual es necesario modelar a través del *software* SAP 2000 el comportamiento estructural del puente km 2.151 del ramal Dubrocq ante la acción de cargas móviles.

Ante esta situación se establece como **hipótesis** que si se realiza la modelación del puente Dubrocq, con la ayuda del *software* SAP 2000 se podría analizar el comportamiento estructural del puente ante la acción de las cargas móviles, logrando una mejor comprensión de los esfuerzos y deformaciones a los que está sometido cada uno de sus elementos estructurales. Para ello se define como **objetivo general**: Analizar mediante el empleo del *software* SAP 2000 el efecto de las cargas móviles en el comportamiento estructural del puente en el km 2.151 del ramal Dubrocq. Para garantizar la realización del mismo se trazan los siguientes **objetivos específicos**:

- Analizar el estado del arte referente al análisis dinámico de estructuras y la modelación computacional.
- Elaborar un modelo computacional del puente del km 2.151 del ramal Dubrocq.
- Analizar los resultados obtenidos para varios esquemas de cargas.

Tareas de la investigación:

- El análisis del estado del arte referente al análisis dinámico de estructuras y modelación estructural.
- La elaboración del modelo computacional.

- El análisis de los resultados obtenidos para varios esquemas de carga.

Métodos Científicos:

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

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

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

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

Modelación. Se refiere a la utilización de un modelo que imita a la realidad a una escala por lo general reducida (modelo icónico), o que entra en analogía con esa realidad (modelo analógico), existiendo además los llamados modelos teóricos. En la actualidad

es posible emplear modelos analógicos a partir de las posibilidades que ofrecen las computadoras y modelos teóricos a partir de comprobaciones matemáticas. Con tales modelos se trabaja y se experimenta, por lo que los mismos sustituyen la labor directa del investigador sobre la realidad que es objeto de investigación. Muchos especialistas consideran que también son modelos aquellas proyecciones que anteceden un resultado, sirviendo de punto de partida para su elaboración definitiva.

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

Estructura de la tesis:

Capítulo 1:

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

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

Capítulo 2:

Se realiza la modelación del puente utilizando el *software* SAP 2000, teniendo en cuenta su geometría, vínculos estructurales, materiales y las cargas móviles que afectan la estructura.

Capítulo 3:

En este último capítulo se analiza el comportamiento de los elementos estructurales del puente, bajo diferentes condiciones de cargas.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

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

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

1.1 Antecedentes del tema

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

Centrándose el tema en el comportamiento de los puentes ante la acción de cargas móviles, existen diversas investigaciones como: Simulación de cargas móviles sobre estructuras mediante un mallado móvil de elementos finitos, de M. Such 2014, donde el autor presenta una metodología para analizar la respuesta dinámica de estructuras sometidas a cargas móviles. También Díaz Garrido 2013 en su trabajo Análisis del Comportamiento Dinámico de un Viaducto Ferroviario sobre el Caño el Águila, estudia una estructura hiperestática, situado en una línea de alta velocidad obteniendo los modos de oscilación y frecuencias naturales.

En el artículo del 2008 *Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles*, de la revista *Computers and Structures*, se investigan los efectos de varios parámetros, que influyen en la respuesta dinámica de puentes de ferrocarril, arrojando como resultados que la distancia entre ejes de *truck* y la velocidad son factores que introducen amplificación dinámica particularmente fuertes. En ocasiones esta amplificación dinámica viene dada por el efecto de la resonancia, estudio que realiza Domínguez Barbero 2001 con el título *Dinámica de puentes de ferrocarril para alta velocidad métodos de cálculo y estudio de la resonancia*.

En Cuba se han llevado a cabo varios estudios sobre esta temática pudiendo mencionar, Análisis Estructural de un Puente en la Autopista Matanzas – Varadero. Modelación y Análisis de su Capacidad de Alfonso Pérez 2006 donde se analiza la respuesta del puente ante la acción de las nuevas cargas del tráfico, utilizando el *software* SAP 2000; también Ramírez 2015 Evaluación de un puente de vías férrea mediante ensayos estructurales y modelación computacional, investiga el comportamiento del puente y determina la velocidad a la cual es seguro circular sin que se produzcan los efectos de la resonancia. Rodríguez Cruz presentando Métodos para el análisis dinámico de puentes frente a cargas móviles realiza una comparación entre los métodos clásicos de análisis dinámico en puentes de ferrocarril y método de integración directa con cargas móviles.

En este trabajo se propone analizar el comportamiento de la estructura ante la acción de las cargas reales que hoy lo afectan. El principal aporte de este trabajo es la aplicación del método de integración directa con cargas móviles en una real aplicando el software SAP 2000.

1.2 Análisis dinámico

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

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

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

El análisis modal es el proceso mediante el cual se determinan las características inherentes de la estructura necesaria para la formulación de un modelo matemático de comportamiento dinámico. Este modelo se lleva a cabo sobre la base de parámetros modales propios de la estructura como son la frecuencia natural, modos de vibración y

relaciones de amortiguamiento que dependen de características tales como masa, rigidez y amortiguamiento.(Rao, 2012)

1.2.1 Vibraciones

Se le puede denominar vibración a cualquier movimiento repetitivo después de un intervalo de tiempo. La teoría de la vibración tiene que ver con el estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y las fuerzas asociadas con ellos. (Rao 2012).

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

Un sistema vibratorio implica la transformación de su energía potencial en energía cinética y esta después en energía potencial de manera alterna; si el sistema es amortiguado va a ocurrir una pérdida de esta energía en cada ciclo de vibración.

Existen varias maneras de clasificar las vibraciones, estas pueden ser:

- Por la causa del movimiento

Vibración libre. Si se deja que un sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial, la vibración resultante se conoce como vibración libre. Ninguna fuerza externa actúa en el sistema.

Vibración forzada. Si un sistema se somete a una fuerza externa (a menudo, una fuerza repetitiva), la vibración resultante se conoce como vibración forzada.

- Por la pérdida de energía

Si no se pierde o disipa energía por fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración no amortiguada. Sin embargo, si se pierde energía se llama vibración amortiguada. En muchos sistemas físicos, la cantidad de amortiguamiento es tan pequeña que puede ser ignorada en la mayoría de las aplicaciones

de ingeniería. Sin embargo, la consideración del amortiguamiento se vuelve extremadamente importante al analizar sistemas vibratorios próximos a la resonancia.

- Por las características de los elementos

Si todos los componentes básicos de un sistema vibratorio (resorte, masa, amortiguador) tienen un comportamiento lineal, entonces se está en presencia de vibraciones lineales; por el contrario si este sistema no se comporta de esta manera, entonces son vibraciones no lineales. Su principal diferencia radica que para un sistema de vibración lineal es válido aplicar el principio de superposición de efecto y las técnicas matemáticas de análisis están bien desarrolladas; mientras que para un sistema no lineal no es aplicable el principio de superposición de efecto y las técnicas de análisis no son tan conocidas.

- Por la determinación de las causas del movimiento

Las vibraciones determinísticas son aquellas en las cuales se conoce el valor o magnitud de la excitación que actúa sobre el sistema en cualquier intervalo de tiempo. En el caso de las vibraciones aleatorias en las cuales la excitación no se puede pronosticar se tiende a hacer una recopilación de registros y se puede estimar este valor a través de métodos estadísticos.

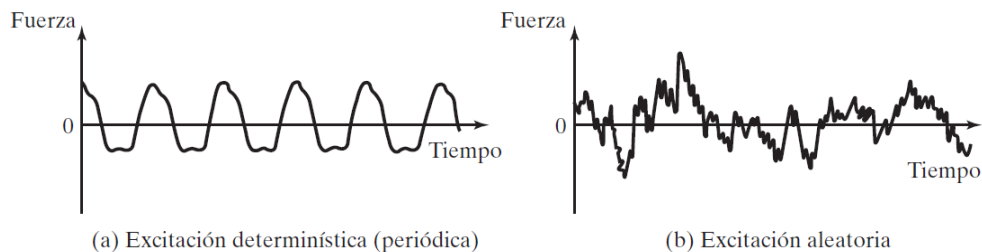


Figura 1.1 Excitaciones determinísticas y aleatorias(Rao, 2012)

1.2.2 Frecuencia natural

Si se deja que un sistema vibre por sí mismo después de una perturbación inicial, la frecuencia con la cual oscila sin la acción de fuerzas externas se conoce como frecuencia

natural. Por tanto, un sistema vibratorio que tiene n grados de libertad, tendrá n frecuencias naturales de vibración distintas. (Rao 2012)

Para un sistema con un grado de libertad (péndulo) su frecuencia natural se determina de la siguiente manera:

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

Donde:

k : rigidez del sistema

m : masa

- Método de Holzer

El método de Holzer es en esencia un esquema de prueba y error para determinar la frecuencia natural. Primero se supone una frecuencia de prueba del sistema, y se determina una solución donde la frecuencia supuesta satisface las restricciones del sistema. Esto por lo común requiere varias pruebas.

El método de Holzer se inicia con una frecuencia de prueba ω y la amplitud de la masa m_i como $X_1 = 1$. Se calcula la fuerza resultante aplicada a la última masa, los cálculos se repiten con otras frecuencias más de prueba. Las frecuencias naturales se identifican como aquellas las cuales provocan que la fuerza sea igual a cero. Para ello se recomienda la utilización de un gráfico frecuencia contra fuerza.(Rao, 2012)

1.2.3 Resonancia

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

Cuando la frecuencia de las fuerzas mecánicas oscilantes coincide con la frecuencia natural de las estructuras tiene lugar el fenómeno de resonancia.

Según Peralta (2009) el fenómeno de la resonancia requiere de:

- a) De un sistema elástico que presente frecuencias naturales de vibración.
- b) De una fuerza externa de tipo periódico que actúe sobre el sistema elástico.
- c) De una coincidencia entre ambos tipos de frecuencia.

Aunque en muchos casos este fenómeno no trae como consecuencia el colapso de la estructura, sí afecta elementos estructurales de importancia y elevan los costos de mantenimiento de la estructura.(Peralta et al., 2009)

1.2.4 Cargas dinámicas

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

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

- Cargas armónicas.

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

Función seno:

$$f(t) = F \operatorname{sen}\omega t \quad (1.2)$$

Función coseno:

$$f(t) = F \operatorname{cos}\omega t \quad (1.3)$$

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

- Cargas móviles.

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

Las cargas móviles pueden clasificarse según la forma de movimiento:

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

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

- Cargas periódicas.

Las cargas periódicas son aquellas que provocan períodos de oscilación constante a lo largo del tiempo.

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

- Cargas aleatorias.

También conocidas como no deterministas son aquellas en las cuales no se conoce con exactitud su valor de fuerza excitatriz, aunque se dispone de información probabilística sobre los mismos.(Sircovich-Saar, 2006)

1.3 Cargas en puentes de ferrocarril

Un puente es una estructura que tiene por objetivo salvar una luz para servir de enlace entre dos puntos. Por su uso se pueden clasificar en puentes de vehiculares, de ferrocarril, peatonales y tecnológicos; todos de gran importancia para el desarrollo de la economía y la sociedad. Como cualquier estructura, se encuentra sometido a cargas permanentes y de uso, pero también a cargas de viento, sísmicas y móviles.

1.3.1 Carga de viento.

Toda construcción se ve afectada por los esfuerzos del viento a excepción de las que son soterradas. La acción que provoca el viento en las estructuras tiene un carácter aleatorio, aunque se puede determinar el rango en el cual va a fluctuar la velocidad, no se puede expresar su valor exacto en un momento dado.(Normalización, 2003)

La carga de viento se define como la presión de este sobre el puente. Para puentes de grandes luces, especialmente de puentes colgantes y suspendidos, la carga de viento suele ser crítica afectando las tensiones y estabilidad del puente.(Lin and Yoda, 2017)

Según la NC 285:2003 se supondrá que el viento actúa horizontalmente en cualquier dirección, fundamentalmente se analizarán las direcciones principales de la estructura.

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

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

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

1.3.2 Cargas sísmicas. NC 46:2017

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

Las cargas sísmicas ocurren en el contacto del suelo con la estructura y depende del riesgo sísmico, las condiciones geotécnicas del lugar, la frecuencia natural de la estructura, etc. La carga de sismo posee una componente en la vertical y otra en la horizontal, pero esta última es la causante de la mayoría de los daños en puentes, por lo cual solo esta se considera en el diseño y análisis de los mismos.(Lin and Yoda, 2017)

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

Tabla 1.1 Tipos de sismos(Normalización, 2017)

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

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

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

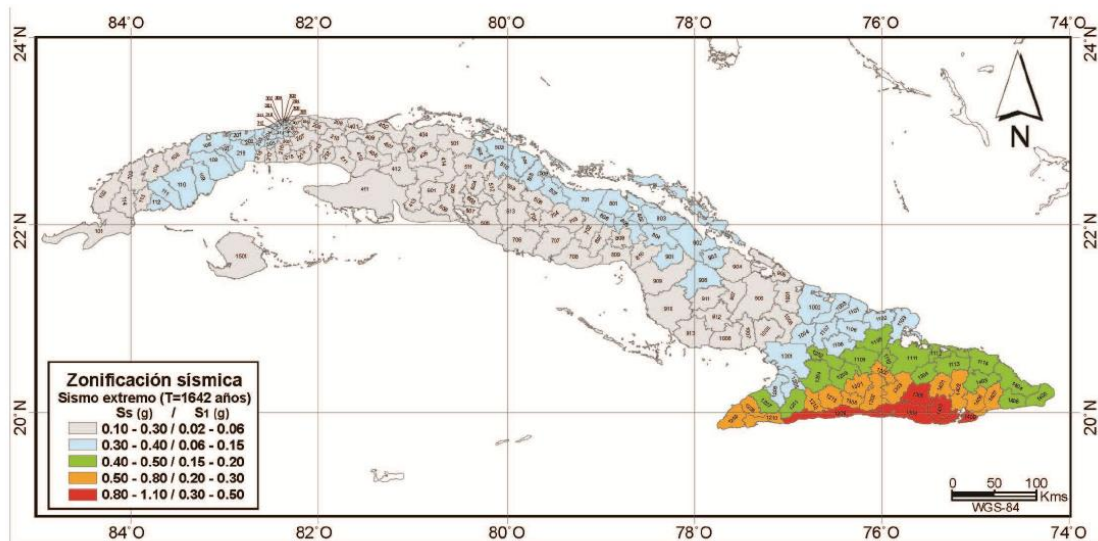


Figura 1.2 Zona sísmica para la República de Cuba (Normalización, 2017)

Los niveles de protección sísmica están dado por la zona de sismicidad, la clasificación de la obra y la posibilidad de exceder el sismo de diseño.

En Zona sísmica 1 no se aplicará el diseño sismorresistentes a ninguna obra. En Zona sísmica 2 se aplica el diseño sismorresistentes solo a las obras catalogadas como esenciales. Las obras utilitarias, ordinarias e importantes no requerirán la aplicación del diseño sismorresistentes en ninguna de las dos Zonas anteriores (1 y 2). (Normalización, 2017)

1.3.3 Cargas de ferrocarril

Existen diferentes características de locomotoras y vagones, todas con diferentes cargas, geometría y distribución de ejes. Según el Itinerario 14 y su suplemento número 3, documentos por el cual se rige la circulación de equipos ferroviarios en Cuba, las locomotoras están clasificadas según su peso en muy pesadas, con una carga por eje mayor de 210 kN, pesadas, de 180 a 210 kN por eje, medianas, de 160 a 180 kN por eje y ligeras, menores que 160kN por eje.(Ferrocarriles, 2003)

Para el diseño de puentes de ferrocarril se emplea la carga característica C-10, conformada por grupos de cargas centradas que no superan las 250 kN por eje.

Para el cálculo de estas estructuras se tienen en cuenta, como principales combinaciones de carga: las cargas permanentes, las cargas verticales móviles y fuerza centrífuga en caso de puentes en curva.(Normalización, 2017)

1.4 Método de elementos finitos (MEF)

1.4.1 Sistemas discretos y sistemas continuos.

Las estructuras, suelen dividirse en discretas o reticulares y continuas. Las primeras son aquellas que están formadas por un ensamblaje de elementos claramente diferenciados unos de otros y unidos en una serie de puntos concretos, de tal manera que el sistema total tiene forma de malla o retícula. La característica fundamental de las estructuras discretas es que su deformación puede definirse de manera exacta mediante un número finito de parámetros, como por ejemplo las deformaciones de los puntos de unión de unos elementos y otros. De esta manera el equilibrio de toda la estructura puede representarse mediante las ecuaciones de equilibrio en las direcciones de dichas deformaciones.(Lizarza, 2000)

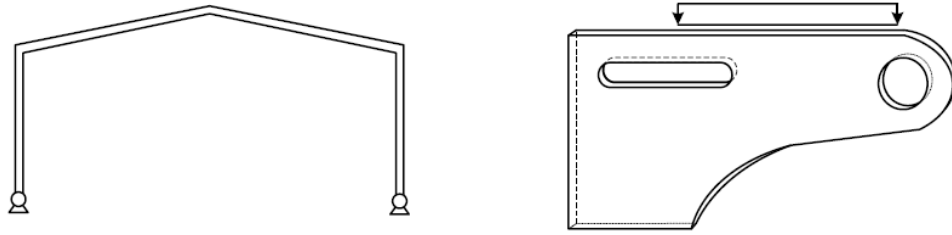


Figura 1.3 Estructura reticulada discreta y estructura continua.(Lizarza, 2000)

Como contrapartida, en los sistemas continuos no es posible separar el sistema en un número finito de elementos estructurales discretos. Si se toma una parte cualquiera del sistema, el número de puntos de unión entre dicha parte y el resto de la estructura es infinito, y es por lo tanto imposible utilizar el mismo método que en los sistemas discretos.

1.4.2 Hipótesis de Discretización.

Un medio continuo tiene infinitas formas posibles de deformarse, independientes unas de otras, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de los puntos restantes, por grande que sea este último. Por lo tanto la configuración deformada de la estructura no puede venir dada por un vector finito como en estructuras discretas, sino que es una función vectorial \mathbf{u} , que indica cuáles son las deformaciones de cualquier punto, y que tiene tres componentes escalares:

$$\mathbf{u} = \begin{cases} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{cases} \quad (1.4)$$

Esta función es la solución de la ecuación diferencial que gobierna el problema, y si éste está bien planteado, cumplirá las condiciones de contorno impuestas, pero en principio no puede asegurarse que esta función \mathbf{u} tenga una expresión analítica manejable, ni siquiera que pueda calcularse. Por lo tanto la función \mathbf{u} no podrá conocerse en general.

Para resolver este problema, el Método de los Elementos Finitos recurre a la hipótesis de discretización, que se basa en lo siguiente:

- El continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos. Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nudos.
- Los desplazamientos de los nudos son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.
- El desplazamiento de un punto cualquiera, viene unívocamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas mediante las ecuaciones constitutivas del material definen el estado de tensiones en el elemento y por supuesto en sus bordes.
- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nudos, que equilibran a las tensiones existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores sobre él actuantes.

Los dos aspectos más importantes de esta hipótesis, sobre los que hay que hacer hincapié son:

- La función solución del problema \mathbf{u} es aproximada de forma independiente en cada elemento. Para una estructura discretizada en varios elementos, pueden utilizarse funciones de interpolación distintas para cada uno de ellos, a juicio del analista, aunque deben cumplirse ciertas condiciones de compatibilidad en las fronteras entre los elementos.

- La función solución es aproximada dentro de cada elemento, apoyándose en un número finito (y pequeño) de parámetros, que son los valores de dicha función en los nudos que configuran el elemento y a veces sus derivadas.

Esta hipótesis de discretización es el pilar básico del MEF, por lo que se suele decir de éste, que es un método discretizante, de parámetros distribuidos. La aproximación aquí indicada se conoce como la formulación en desplazamiento.(Lizarza, 2000)

1.5 Modelación estructural

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

En la actualidad el empleo de las herramientas informáticas ha tenido un auge extraordinario en la modelación estructural. Utilizando el método de elementos finitos se encuentran gran variedad de programas como ABAQUS, ANSYS, SAP 2000, ETABS, STAAD, RESCOL.(Alfonso et al., 2015)

Para que un modelo describa el comportamiento de una estructura lo más real posible debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La geometría de la estructura.
- Propiedades de los materiales que la constituyen.
- Ubicación y magnitud de las cargas.
- Elementos que la componen ya sean en una, dos o tres dimensiones.
- Conexiones internas entre los elementos.
- Los apoyos externos y la interacción de la estructura con el medio.

La modelación estructural atraviesa por varias etapas, estas son:



Figura 1.4 Etapas de la modelación estructural(García, 2015)

1.5.1 Ventajas y desventajas de la modelación computacional

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

Ventajas:

- Suple la experimentación física y convencional, cuando ella no es factible por diversas razones.
- Permite analizar numerosos efectos al realizar diversas alteraciones.
- Permite incluir elementos de incertidumbre.
- Tiempos rápidos de respuesta
- Facilita el entrenamiento de personal y la enseñanza-aprendizaje de sistemas complejos y análisis diversos.
- Permite experimentar con situaciones nuevas y anticipar resultados

Desventajas:

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

1.6 Conclusiones Parciales

El análisis dinámico se realiza a estructuras sometidas a vibraciones y oscilaciones que son provocadas por cargas dinámicas. En puentes, son las cargas móviles, uno de las principales fuerzas que provocan estos fenómenos. Es de vital importancia estudiar el fenómeno de la resonancia ya que puede deteriorar el correcto funcionamiento de la estructura.

En la actualidad el uso de herramientas informáticas para la modelación estructural asume un papel importante, obteniendo de esta, resultados del comportamiento de las estructuras analizadas, en un corto período de tiempo y pudiendo realizar pruebas en el modelo sin tener que afectar la estructura real.

CAPÍTULO 2 MODELACIÓN DEL PUENTE KM 2.151 DEL RAMAL DUBROCQ

En este capítulo se lleva a cabo una descripción del puente en cuanto a geometría, materiales, vínculos a tierra y entre los elementos estructurales, cargas y secciones; con el objetivo de elaborar un modelo en el *software* SAP 2000 lo más real posible. Para lograrlo se realiza la calibración del modelo y de esta manera se logra analizar con mayor precisión su comportamiento bajo la acción de las cargas móviles.

2.1 Geometría

Tipológicamente el puente está construido por cerchas tipo Warren, con un cordón inferior que posee 8 vigas longitudinales de 5 metros cada una, para lograr una única luz de 40 metros, posee 7 montantes de 8 metros y 8 diagonales distribuida de la siguiente forma. (Pérez et al., 2012)

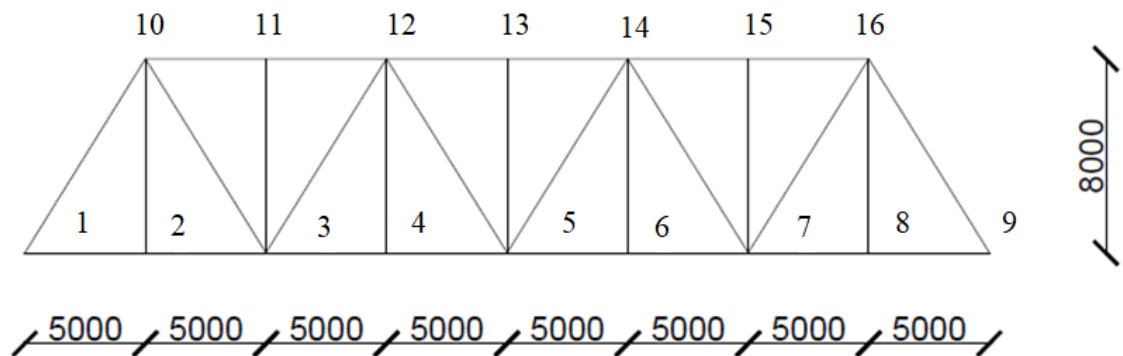


Figura 2.1 Geometría de la armadura del puente (elaboración propia)

Desde una vista en planta de la parte inferior se observa las 9 vigas transversales de 7,5 metros y 16 vigas longitudinales sobre las que se apoyan las traviesas de madera de la superestructura del puente. Además cuenta con 16 diagonales que se cruzan y unen las vigas del cordón inferior.

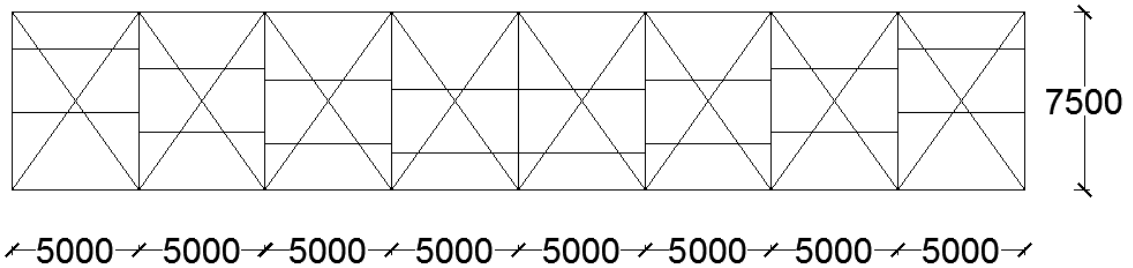


Figura 2.2 Geometría del tablero (elaboración propia)

Con respecto a la parte superior de la armadura, no posee las vigas longitudinales que presenta el tablero ya que la función de estas es soportar las traviesas de madera y tiene solo 6 vigas longitudinales correspondientes al cordón superior de la armadura, 7 vigas transversales y 12 diagonales distribuidas de la misma manera que el tablero.

2.2 Materiales

Se tiene en consideración, debido a que la obra fue construida hace más de 100 años, que el material utilizado es un acero con una tensión de fluencia de 2100 kg/cm^2 , ya que era el más usado en su época y no se cuentan con información, ni con ensayos que describan las características del material. (Pérez et al., 2012)

La interfaz de usuario muestra los siguientes campos de entrada:

- Material Name:** A36
- Material Type:** Steel
- Symmetry Type:** Isotropic
- Modulus of Elasticity (E):** 2038901.9
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 7.849E-03
 - Mass per Unit Volume: 8.004E-06
- Units:** Kgf, cm, C
- Poisson (U):** 0.3
- Other Properties For Steel Materials:**
 - Minimum Yield Stress, Fy: 2100.
 - Minimum Tensile Stress, Fu: 3350.
 - Expected Yield Stress, Fye: 3796.576
 - Expected Tensile Stress, Fue: 4485.5842
- Coeff of Thermal Expansion (A):** 1.170E-05
- Shear Modulus (G):** 784193.
- Advanced Material Property Data:**
 - Nonlinear Material Data...
 - Material Damping Properties...
 - Time Dependent Properties...
 - Thermal Properties...

Botones: OK, Cancel

Figura 2.3 Propiedades del Acero A 36 (SAP 2000)

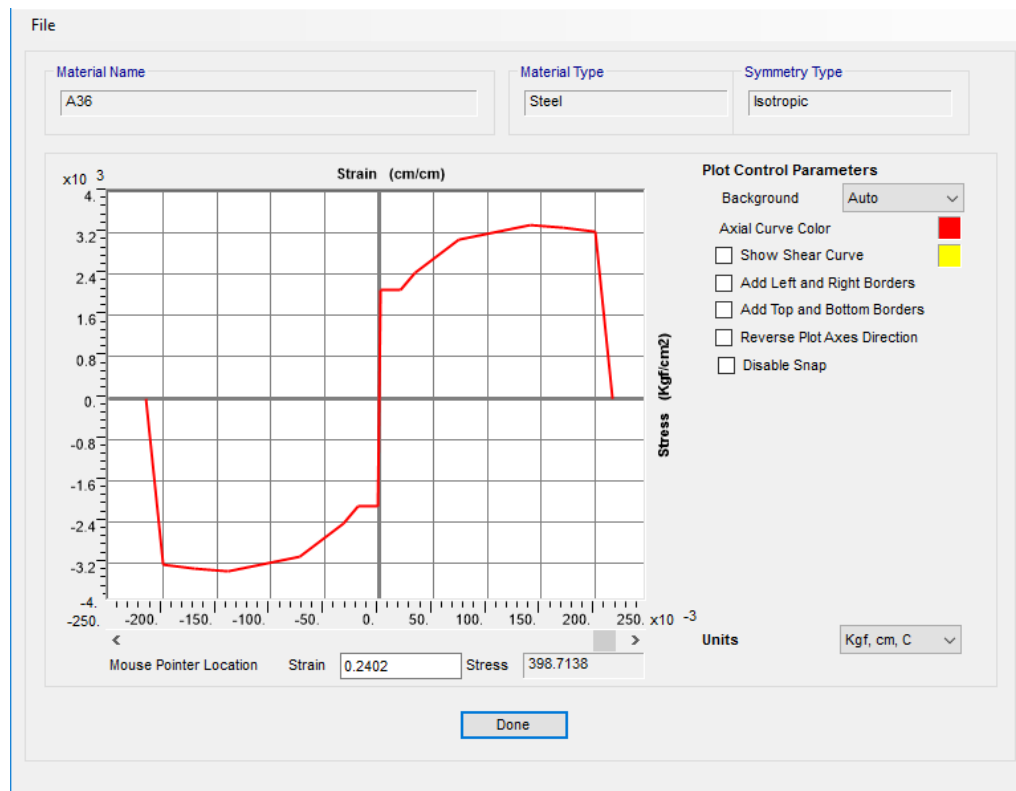


Figura 2.4 Curva de comportamiento del Acero A 36 (SAP 2000)

Un acero con estas características posee un comportamiento lineal hasta que alcanza su límite de fluencia en 2100 kg/cm² con una deformación de 0,02, luego de esto comienza a deformarse ante un incremento muy bajo de las tensiones hasta llegar a la tensión de rotura.

2.3 Secciones

La estructura cuenta con 8 secciones diferentes, una para cada tipo de elemento que compone la armadura de acero.

Los arriostres superiores e inferiores están compuestos por dos perfiles angulares de L x 130 x 95 x 12 unidos mediante soldadura por su lado mayor.

El cordón inferior de la armadura está compuesto por dos secciones. Los dos primeros elementos a cada lado, 1-2 y 2-3 al igual que 7-8 y 8-9 están formados por dos perfiles canales separados a 320 mm, con 310 mm de altura y una longitud de sus alas de 75 mm,

con un espesor tanto para el alma como de las alas de 10 mm. Mientras que en los elementos 3-4, 4-5, 5-6 y 6-7 la sección anterior es reforzada en su alma con platabandas de 200 mm de largo y 16 mm de espesor.

La sección del cordón superior de la armadura es una combinación de cuatro perfiles angulares L 100 x 80 x 10, unidos en la vertical por platabandas de 400 mm de largo y 100 mm de espesor y en la parte superior de forma horizontal, una platabanda de 510 mm de longitud y 100 mm de espesor.

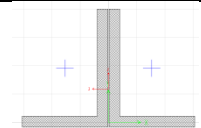
Las diagonales de la armadura están formadas por dos perfiles canales con una longitud del alma de 340 mm y alas de 75 mm, con una separación entre ellas de 320 mm.

Los montantes y las vigas transversales superiores están formados por 4 perfiles angulares L 130 x 95 x 12.

La sección de las vigas longitudinales es una conformación de 4 perfiles angulares unidos por platabandas. Los primeros son perfiles L 150 x 150 x 13 que se encuentran unidos mediante pernos a los extremos de una platabanda de 610 mm de longitud y un espesor de 10 mm y en la parte superior unido de la misma forma a otra platabanda de 290 mm de longitud y un espesor de 12mm.

La forma de las vigas transversales inferiores es muy parecida a las vigas longitudinales. En este caso los perfiles angulares son L 150 x 150 x 16, la platabanda a la cual están unidos tiene una longitud de 970 mm y un espesor de 10 mm, mientras que la platabanda de la parte superior tiene una longitud de 330 mm y un espesor de 16 mm.(Pérez et al., 2012)

Tabla 2.1 Secciones de los elementos. (SAP 2000)

<i>Descripción</i>	<i>Simbología</i>	<i>Vista previa</i>
Arriostres superiores e inferiores	AR S - AR I	

Cordón inferior reforzado	CIR	
Cordón inferior sin refuerzo	CIS	
Cordón superior	CS	
Diagonales internas y externas	DI - DE	
Montantes y vigas transversales superiores	Mont - VTS	
Vigas longitudinales	VL	
Vigas transversales inferiores	VTI	

2.4 Vínculos

La armadura está apoyada sobre cuatro apoyos, de ellos dos fijos y dos móviles, y estos a su vez descansan sobre estribos de hormigón masivo. Por lo cual se define la estructura como isostática.

En cuanto a las uniones entre los elementos que conforman la armadura, son rígidas (empotramientos) mediante la utilización de soldaduras y pernos. (Pérez et al., 2013)



Figura 2.5 Ejemplo de Junta (tomada por el autor)

2.5 Cargas

En la actualidad las cargas que circulan por el ramal Dubrocq están recogidas en el Itinerario 14 y su suplemento número 3, documentos por el cual se rige la circulación de equipos ferroviarios en Cuba.

Para obtener un comportamiento de la estructura lo más real posible, se realiza la calibración del modelo con el empleo de pruebas de cargas realizadas por la EMPAI Matanzas, para posteriormente colocar las cargas reales a las cuales está sometido hoy el puente.

2.5.1 Prueba de carga

La prueba de carga se efectuó el día 13 de abril del año 2018. Para ella se empleó un tren con 3 cisternas diesel a máxima capacidad, con una carga total de 820 a 840 kN por lo cual se tiene entre 205 y 210 kN por eje. Para el caso de las cisternas que se emplearon, la distancia entre ganchos es de 15.09 m, la distancia del gancho al centro del *truck* es de 2.85 m y resta una distancia entre los *truck* de 9.39 m. La distancia entre ejes de un mismo *truck* es de 2.4 m.(Pérez, 2018)

El análisis realizado fue estático y se tuvieron en cuenta 4 posiciones de cargas como se muestran en las figuras.

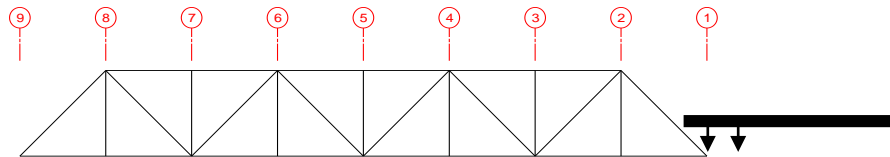


Figura 2.6 Posición 0: Puente vacío (Pérez, 2018)

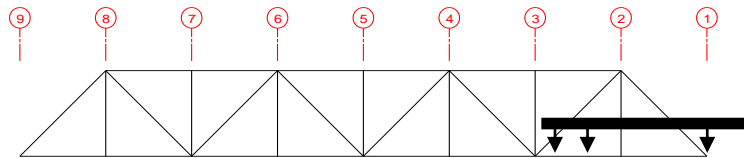


Figura 2.7 Posición 1: Carga de un truck(Pérez, 2018)

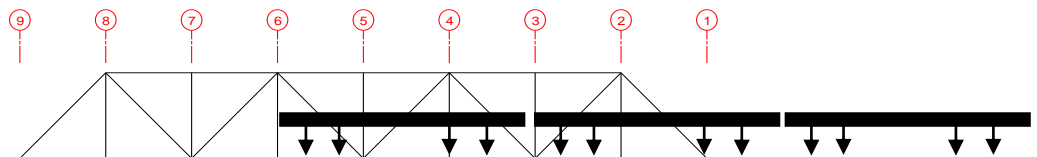


Figura 2.8 Posición 2: Carga de tres truck(Pérez, 2018)

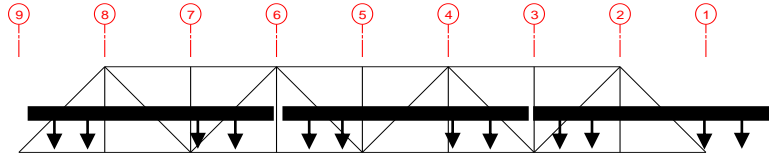


Figura 2.9 Posición 3: Carga de cinco truck (Pérez, 2018)

Como resultado de la prueba de carga se determinó que la estructura del puente en su estado actual está en condiciones de soportar las cargas circulantes. (Pérez, 2018)

2.5.2 Cargas reales de circulación

Al día de hoy según el suplemento número 3 del Itinerario 14 la locomotora más pesada que circula por este ramal es la DF7G-C con una carga por eje de 205 kN, se clasifica como pesada, con una distancia entre enganches de 18.8 m y 6 ejes. (Ferrocarriales, 2012)

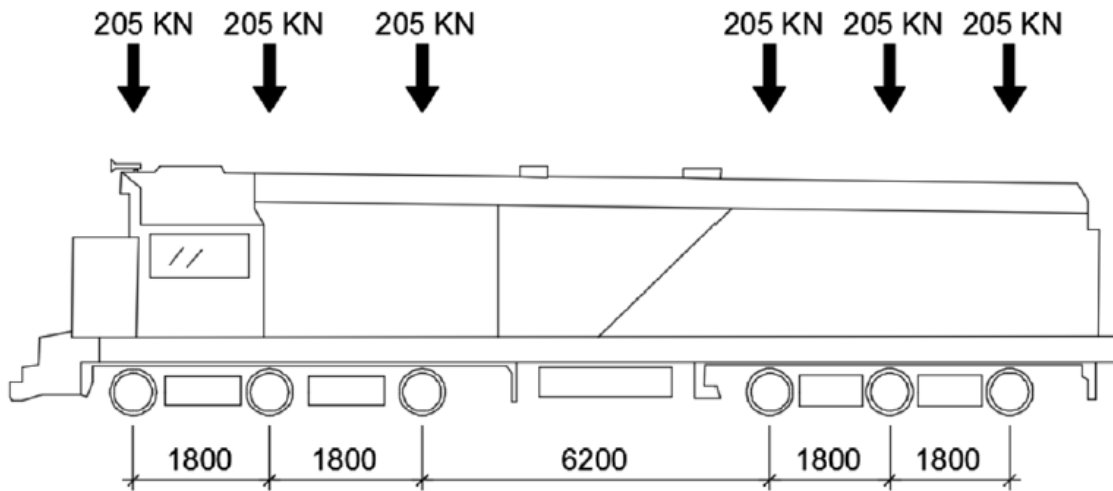


Figura 2.10 Esquema de la Locomotora DF7G-C (Ramírez Díaz et al., 2015)

Por este ramal no circulan vagones de pasajeros, dejando solo los vagones de carga. Estos están clasificados en casillas, plataformas, góndolas, cisternas, silos, vagones refrigerados, *hopper* dosificador, *hopper*, volquetas, jaula para ganado y jaula para caña. Cada uno con diferentes dimensiones y capacidades de carga.

2.6 Calibración

Para que un modelo se considere correctamente elaborado es necesario que posea las mismas características que la estructura real, de tal manera que su comportamiento llegue a ser prácticamente el mismo. Para lograrlo, en este caso, se comparan las deformaciones obtenidas en las pruebas de carga realizadas en el año 2018 con las arrojadas por el *software* SAP 2000.

En la prueba de carga se midieron las deformaciones verticales en el centro de las cerchas a ambos lados, definiendo un punto 1 en la cercha de cara al mar y un punto 2 en la cercha de cara al río.

Para la realización de la calibración se tuvo en cuenta que las mediciones que se hicieron en la prueba de carga, no incluían el peso propio de la estructura, ni el peso de carriles y traviesas, esto es debido a que cuando coloca se el nivel en el punto 1 y 2, se define que la flecha es 0, algo que no es cierto porque sí existen deformaciones debido al peso de los elementos anteriormente mencionados.

Los resultados obtenidos del modelo, a partir de las cargas descritas en la prueba, son comparados con las deformaciones obtenidas en la prueba de carga revelando que estas son similares, pudiendo afirmar que el modelo se encuentra correctamente calibrado

2.7 Estados de Cargas

Para la elaboración del modelo se tuvo en cuenta 6 esquemas de cargas, uno de ellos para conocer el comportamiento de la estructura ante la acción de las cargas de viento extremo y los 5 restantes con un tren conformado de una locomotora DF7G-C y 20 *hopper* dosificadores. La velocidad máxima permisible para una curva de 112 m de radio, es de 50 km/h, por lo cual se analizan las condiciones para el 25%, 50%, 75% y 100% de esta velocidad.

Exceptuando el estado correspondiente a la carga de viento, se ejecuta un modelo con carga tipo móvil, en este caso no es necesario definir la velocidad. Para los restantes estados se utiliza un tipo de carga *time history* con un tipo de análisis lineal y soluciones

tipo integración directa, teniendo en cuenta velocidades de 12 km/h, 25 km/h, 37.5 km/h y 50 km/h para cada uno de los estados de carga.

Se obtiene a partir de estos análisis, la influencia que trae consigo a la estructura el incremento de la velocidad de circulación. Además, determinar las deformaciones en el centro del puente, del lado del mar (punto 1) y del lado del río (punto 2) y definir el coeficiente de ratio (tensión actuante entre la tensión admisible del material) que ofrece el comportamiento del agotamiento de la sección.

2.8 Conclusiones Parciales

La estructura corresponde a un puente metálico con cerchas tipo Warren que cubre una luz de 40 m. Posee 8 tipos de secciones diferentes, unidas entre sí por pernos o soldaduras y se encuentra simplemente apoyado sobre estribos de hormigón masivo.

Se tienen en cuenta 6 estados de carga diferentes, con variaciones en la velocidad para analizar el comportamiento que trae consigo el aumento o la disminución de la misma. También se determinan las deformaciones y el coeficiente de ratio de los elementos.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MODELACIÓN

Se realiza un análisis de los resultados obtenidos para varios estados de cargas y velocidades, comprobando el comportamiento de cada elemento ante la acción de cargas móviles.

3.1 Deformaciones de las cerchas a ambos lados del puente

Después de realizar diferentes pruebas a la estructura del puente, con diferentes velocidades y tipos de análisis, se obtienen los siguientes resultados.

3.1.1 Análisis de las deformaciones para la Carga Móvil

El puente presenta una deformación como se muestra en la figura, señalando como lugares de flecha máxima en el centro de la luz, el punto 1 (lado del mar) con 23,6 mm y punto 2 (lado del río) con 29,8 mm.

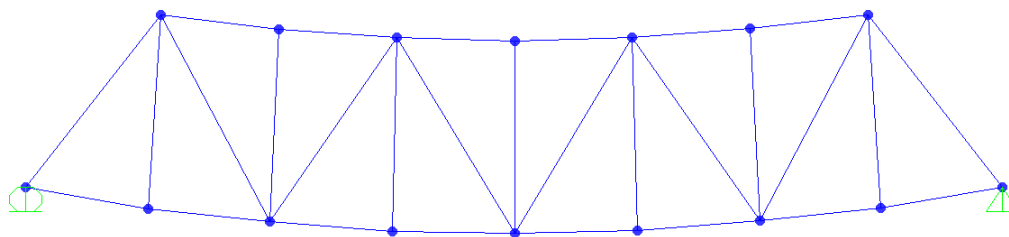


Figura 3.1 Gráfico de las Deformaciones SAP 2000 para Análisis de Cargas Móviles

3.1.2 Análisis de las deformaciones para la Carga de Viento

En el siguiente estado de carga se tiene en cuenta la acción del viento sobre la estructura. El puente, ante la acción de las cargas, posee una deformación como se muestra en la figura, señalando como lugares de flecha máxima en el centro de la luz, el punto 1 (lado del mar) con 5,6 mm y punto 2 (lado del río) con 10,14 mm.

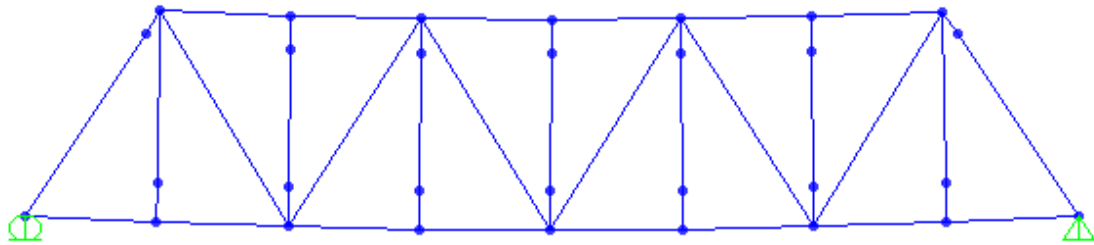


Figura 3.2 Gráfico de las Deformaciones SAP 2000 para Análisis de la Carga de Viento

3.1.3 Análisis Time History para las velocidades definidas en los estados de cargas

Ante la acción de las cargas móviles, aplicando el método de integración directa, empleando el software SAP 2000, para el 25%, 50%, 75% y 100% de la velocidad de diseño, se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 3.1 Deformaciones en el centro del puente SAP 2000

<i>Velocidad</i>	<i>Cercha al Mar (mm)</i>	<i>Cercha al Río(mm)</i>
12 km/h	23,49	29,76
25 km/h	23,49	29,76
37 km/h	23,79	30,05
50 km/h	23,86	30,04

En comparación con las deformaciones obtenidas del análisis con las cargas móviles los resultados son similares. A continuación se observa el comportamiento de las deformaciones con relación a las velocidades que se analizan.

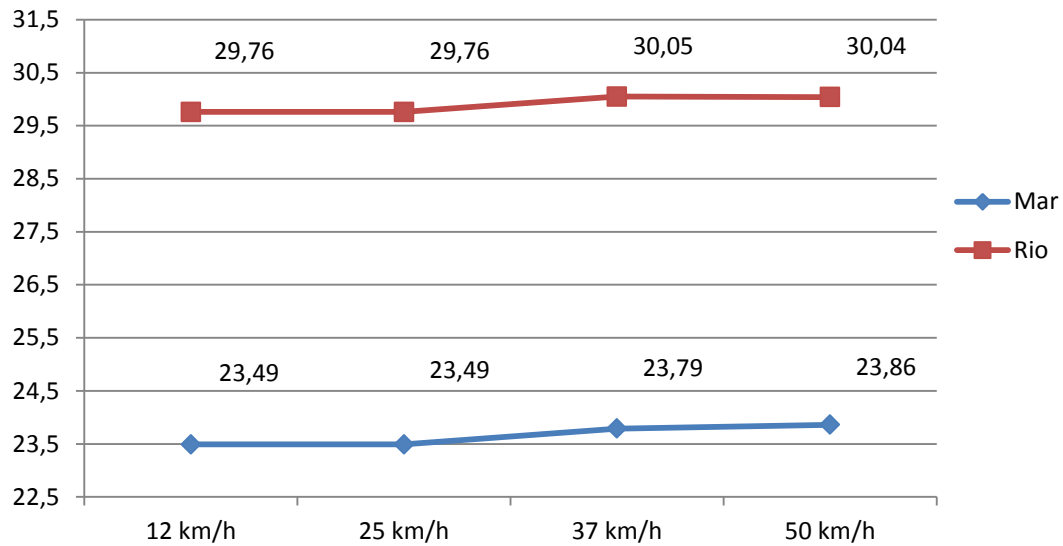


Figura 3.3 Gráfico de deformaciones en función de la velocidad (elaborado por el autor)

Se aprecia que a pesar del incremento de la velocidad, la deformación se comporta casi constante, tanto para la cercha del lado del mar como para la del lado del río, por lo cual se puede deducir que un aumento en la velocidad no provoca un aumento en las deformaciones del puente.

3.2 Capacidad portante de los elementos estructurales

Para conocer la demanda a la que están sometidos los elementos que componen la estructura del puente se ofrece el coeficiente de ratio (tensión actuante entre la tensión admisible del material) para cada estado de carga.

3.2.1 Capacidad portante de los elementos bajo la acción del Estado de Carga referente a Cargas Móviles

Se obtuvo como resultados que de los 168 elementos de los que está compuesto el modelo elaborado en SAP 2000, el 95% posee un coeficiente de ratio menor de 0,496; solo 7 elementos obtienen un valor superior al anterior expuesto, y de estos el mayor

valor alcanzado es 0,74 demostrando que la estructura del puente, en su mayoría, se encuentra trabajando a menos del 50% de su capacidad real.

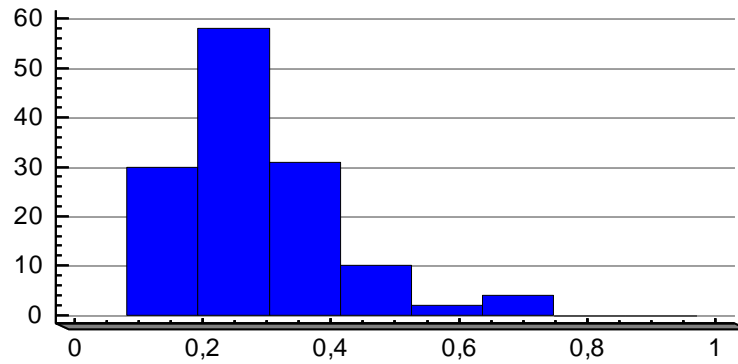


Figura 3.4 Histograma del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga Móvil

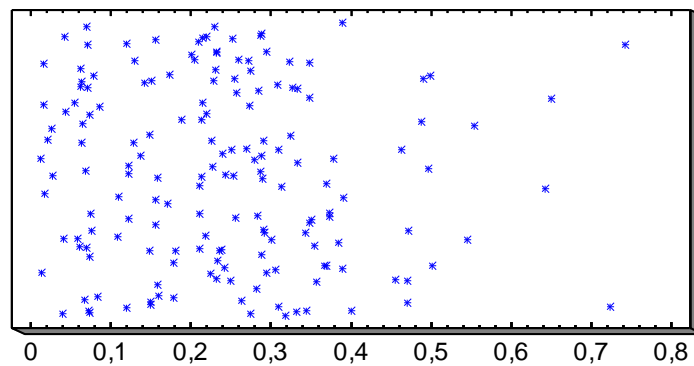


Figura 3.5 Gráfico de Dispersión del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga Móvil

3.2.2 Capacidad portante de los elementos bajo la acción del Estado de Carga referente a la Acción de la Carga de Viento

Como resultado de la acción del viento sobre la estructura del puente Dubrocq se obtiene que, el 95% de los elementos responden de manera favorable, obteniendo valores de coeficiente de ratio inferiores a 0,468 y el máximo valor para este esquema de cargas es de 0,82 un poco más grande que el anterior, pero de igual manera es capaz de resistir las cargas.

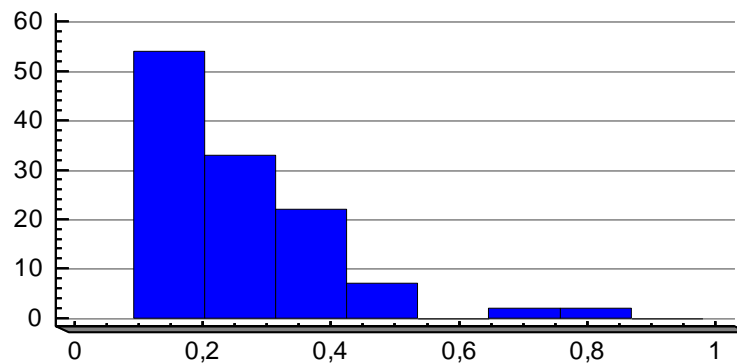


Figura 3.6 Histograma del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga Móvil

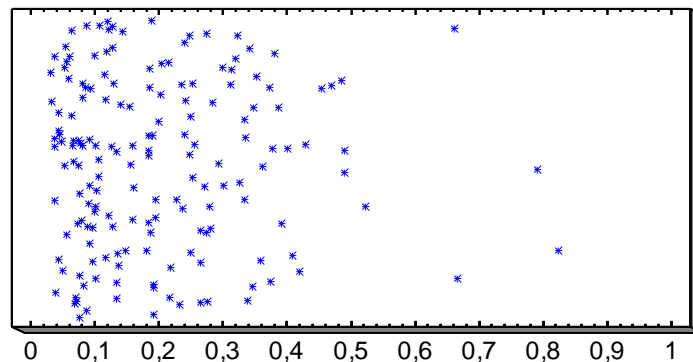


Figura 3.7 Gráfico de Dispersión del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga Móvil

3.2.3 Capacidad portante de los elementos, bajo la acción de los Estados de Cargas pertenecientes a los Análisis de Integración Directa, teniendo en cuenta las velocidades.

Teniendo en cuenta la velocidad a la cual circula el material móvil en esta vía, nunca superior a 50 km/h que es lo máximo permitido en una curva horizontal con estas características, se obtuvieron del modelo, los siguientes resultados.

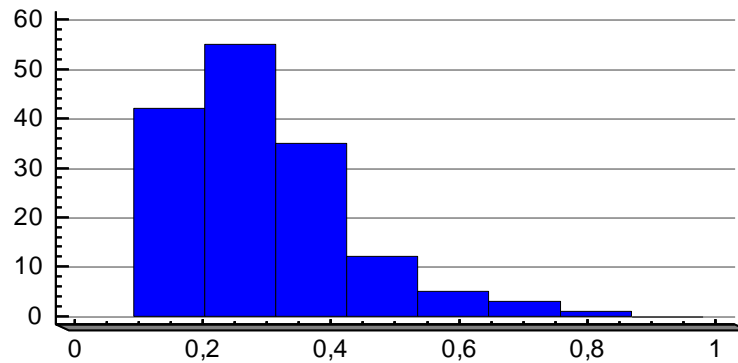


Figura 3.8 Histograma del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 12 km/h

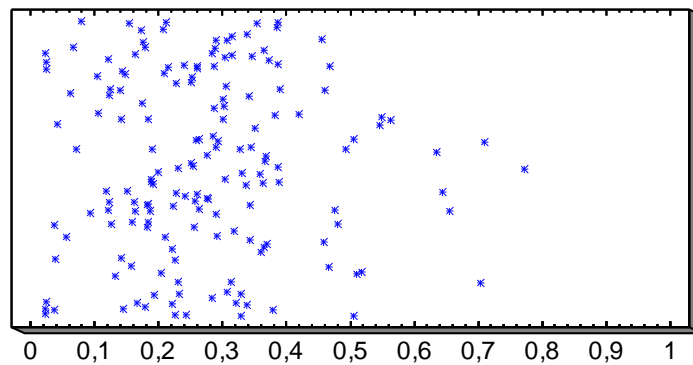


Figura 3.9 Gráfico de Dispersión del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 12 km/h

Para una velocidad de 12 km/h se obtuvo que, poco más del 90% de los elementos resisten una tensión menor que el 50% de la tensión admisible del material, y de los restantes el mayor valor del coeficiente de ratio es de 0,77.

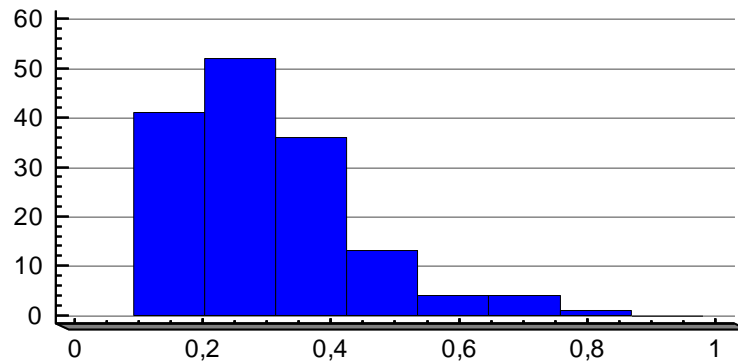


Figura 3.10 Histograma del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 25 km/h

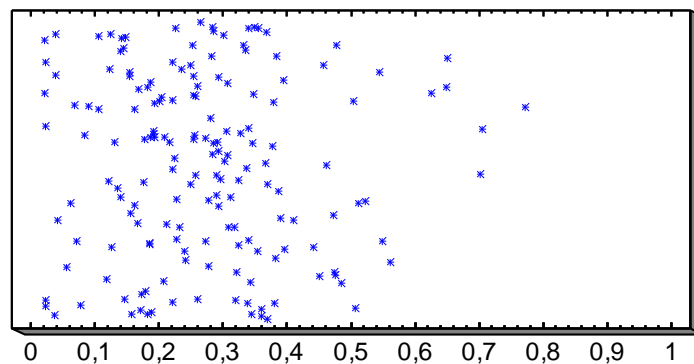


Figura 3.11 Gráfico de Dispersión del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 25 km/h

Incrementando la velocidad a 25 km/h se obtuvo que, el 90% de los elementos poseen un coeficiente menor que 0,47 y de los restantes el mayor valor es de 0,77.

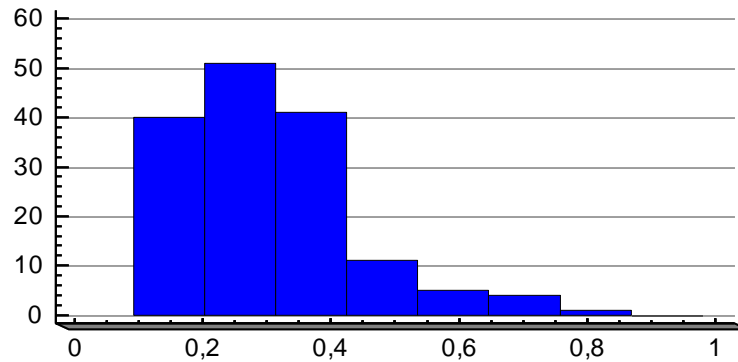


Figura 3.12 Histograma del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 37,5 km/h

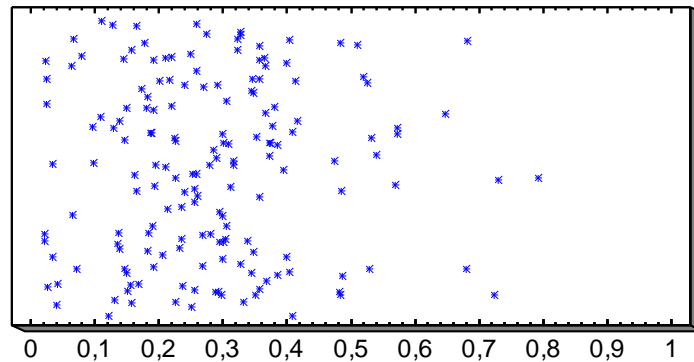


Figura 3.13 Gráfico de Dispersión del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 37,5 km/h

A una velocidad de 37,5 km/h se obtuvo que, el 90% de los elementos poseen un coeficiente menor que 0,48 y el mayor valor obtenido es de 0,79.

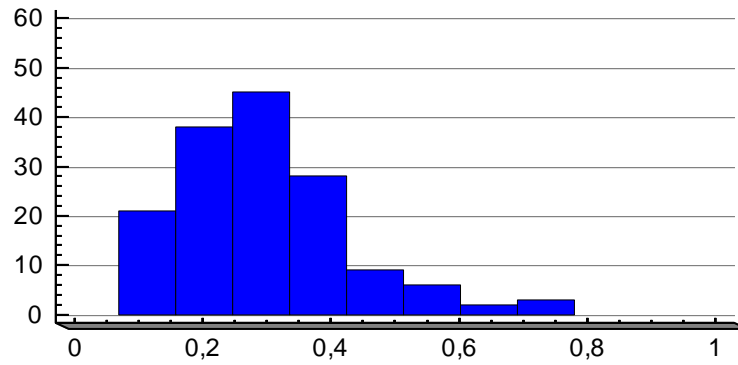


Figura 3.14 Histograma del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 50 km/h

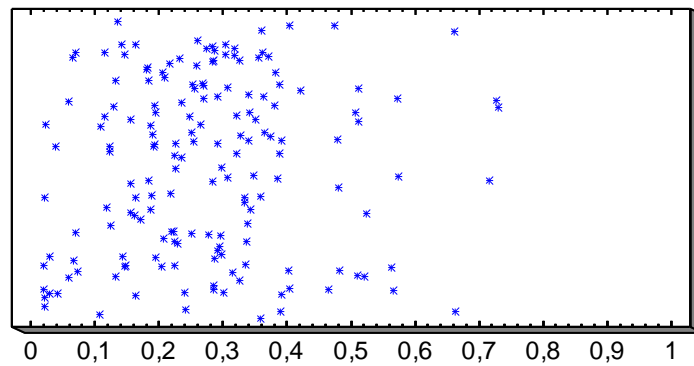


Figura 3.15 Gráfico de Dispersión del coeficiente de Ratio para el Esquema de Carga con una velocidad de 50 km/h

A una velocidad de 50 km/h se obtuvo que, el 90% de los elementos poseen un coeficiente menor que 0,48 y el mayor valor obtenido es de 0,73.

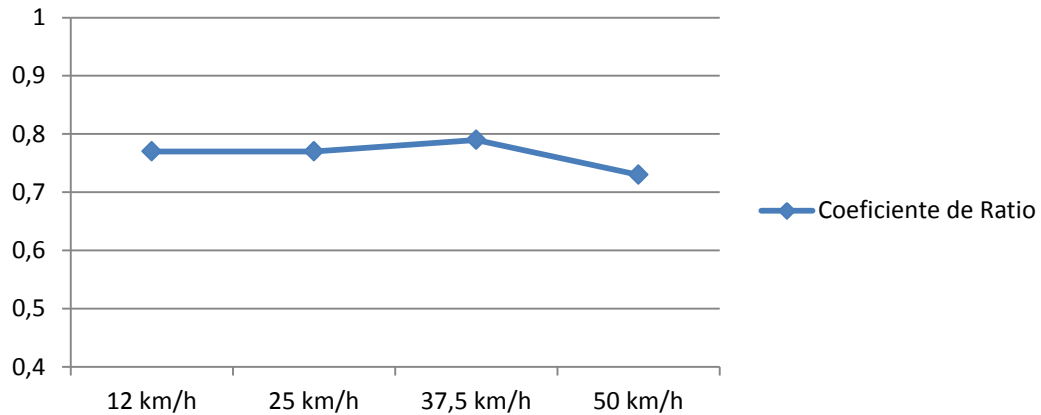


Figura 3.16 *Gráfico de coeficiente de Ratio máximo en función de la velocidad*

Para cada una de las distintas velocidades se cumple que cerca del 90% de los elementos trabajan al 50% de su capacidad real y los mayores valores de coeficiente de ratio con el aumento de la velocidad se mantienen en un rango 0,72 y 0,79. Por tanto se puede plantear que la velocidad, no es un factor que afecte directamente la capacidad portante de la estructura del puente km 2.151 del ramal Dubrocq.

3.3 Modos de Vibración

Con la ayuda del software se analizan las formas modales que posee la estructura y se determina que de las 12 obtenidas la número dos se asemeja a la forma con que oscila la estructura ante la acción de las cargas móviles. Esta forma modal alcanza un período de 0.15 segundos y una frecuencia de 6.47 ciclos por segundo.

A continuación se muestra los desplazamientos de la estructura en función del tiempo, ofreciendo una perspectiva de las oscilaciones que en esta ocurren. Este análisis se ha realizado para cada velocidad ya que no posee las mismas vibraciones.

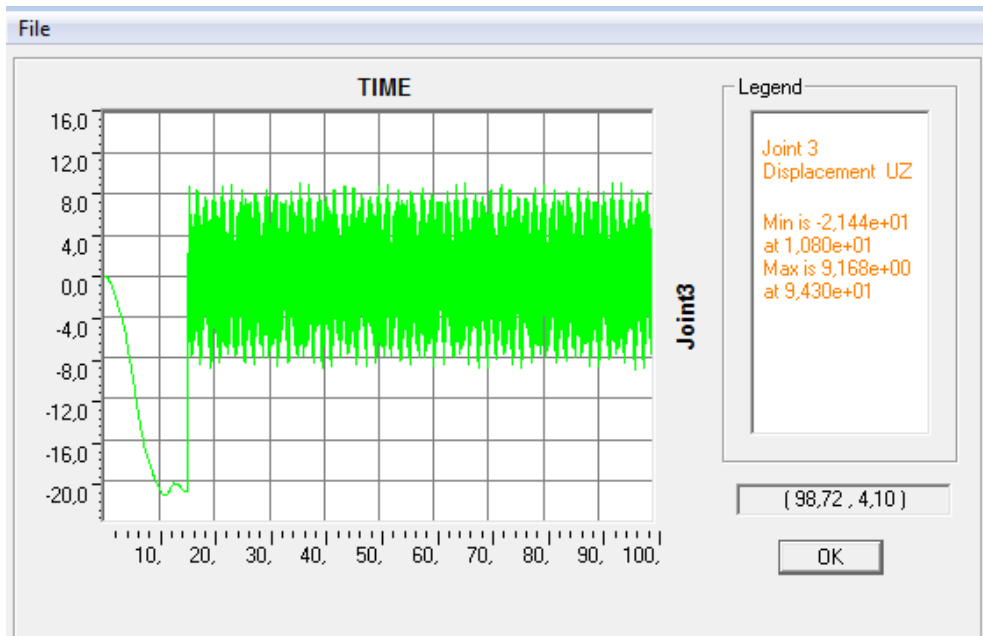


Figura 3.17 Velocidad 12 km/h Desplazamiento (SAP 2000)

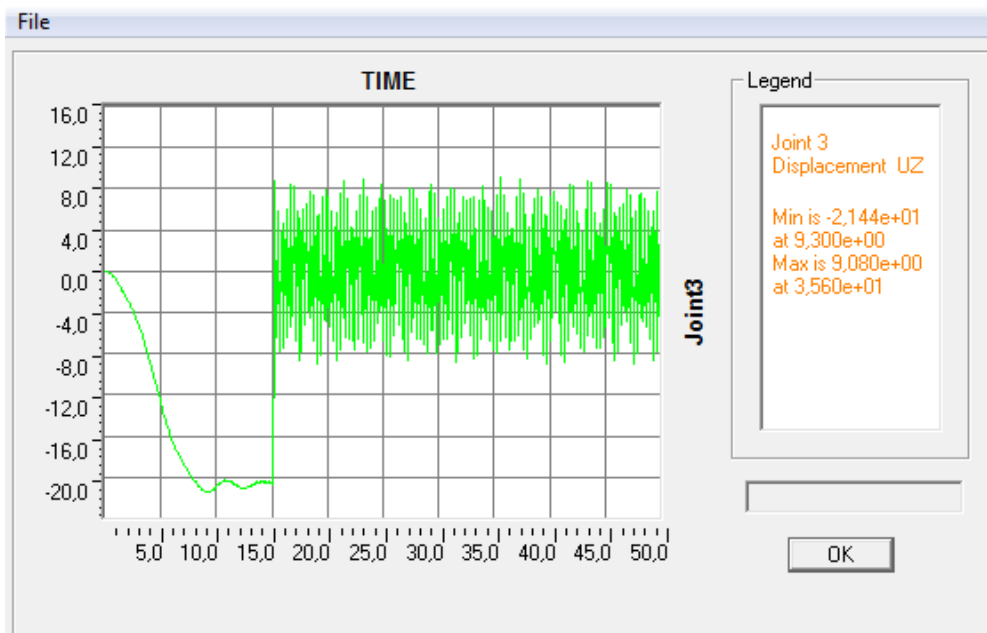


Figura 3.18 Velocidad 25 km/h Desplazamiento (SAP 2000)

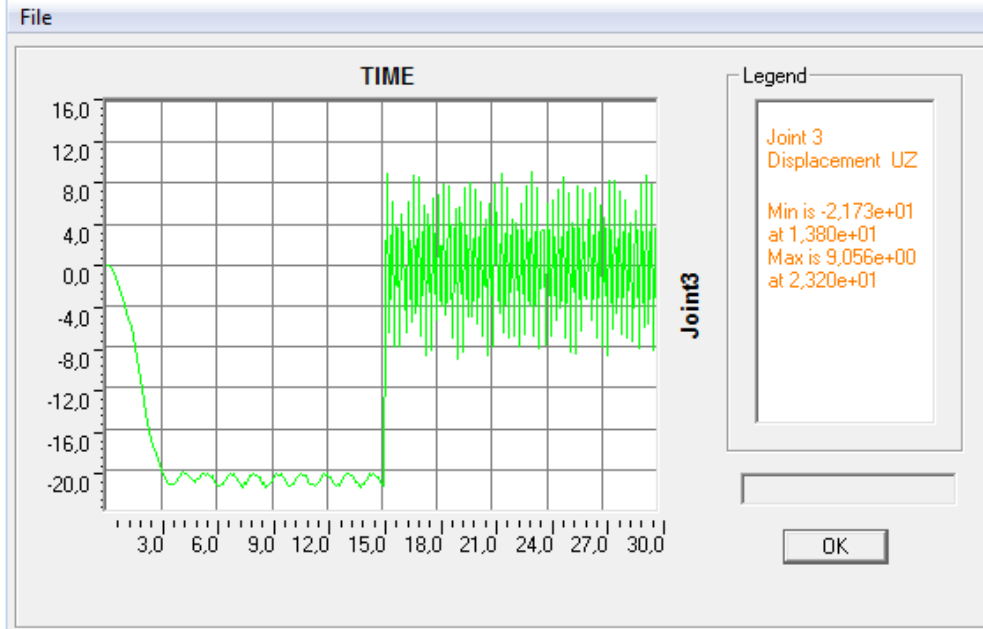


Figura 3.19 Velocidad 37.5 km/h Desplazamiento (SAP 2000)

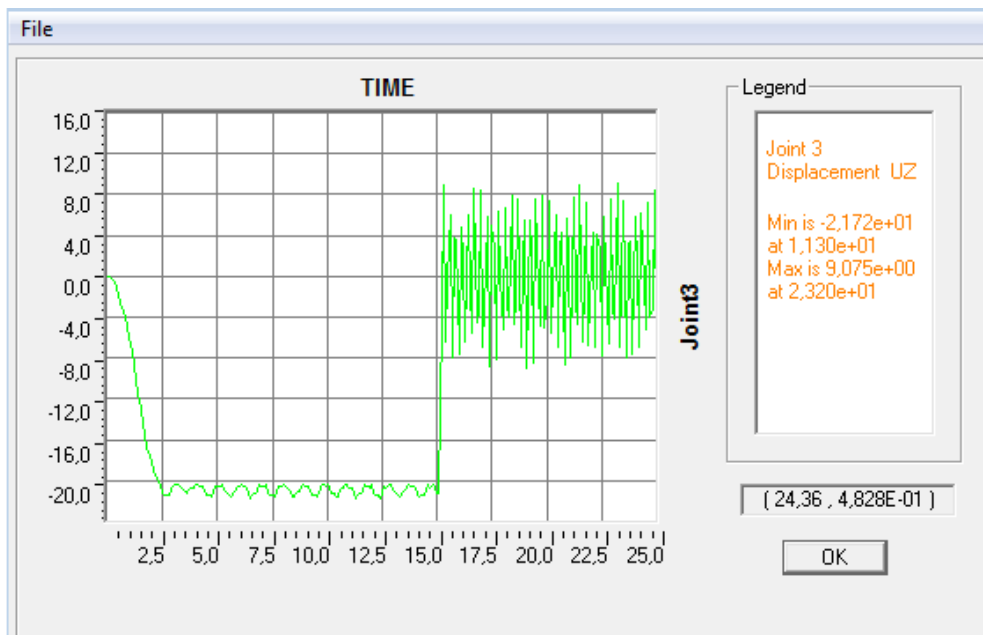


Figura 3.20 Velocidad 50 km/h Desplazamiento

Para una velocidad de 12 km/h se observa que en un primer momento la deformación incrementa y luego disminuye haciendo vibrar la estructura. Esto se debe a que en un

primer momento la estructura oscila de una forma y luego cambia hacia otro modo de oscilación diferente al anterior.

Esto también ocurre con las velocidades de 25 km/h, 37.5 km/h y 50 km/h; solo que en estos casos el tiempo que demora de un modo a otro es un poco mayor y sigue en aumento a medida que aumenta la velocidad.

En ninguno de los casos analizados la frecuencia a la que oscila la estructura es semejante a la obtenida en la forma modal, por lo que se puede afirmar que la estructura no se ve afectada por el efecto de la resonancia.

3.4 Conclusiones Parciales

Para los seis modelos realizados se observa que, el coeficiente de ratio en el 90% de los elementos es menor que el 0.5, salvo en algunos casos que llega a ser de 0.5 a 0.8, por lo que se expresa que estos elementos se encuentran trabajando alrededor del 50% de su capacidad real como promedio.

Para las velocidades analizadas no concurre el efecto de resonancia, ya que la estructura oscila con frecuencias que no se asemejan a la frecuencia natural de la estructura.

Con estos resultados obtenidos se demuestra que, a pesar de realizar un incremento en la velocidad del material móvil que circula por este puente, no existen diferencias significativas en el coeficiente de ratio, ni en las deformaciones que estas producen.

CONCLUSIONES

1. Hoy en día la modelación computacional cobra un gran auge en el análisis de las estructuras bajo cargas dinámicas, con la ayuda de software y herramientas, que a través del Método de Elementos Finitos ofrece la posibilidad de elaborar modelos numéricos de alta precisión que simulan el comportamiento de la estructura a escala real.
2. La modelación estructural resulta, en numerosas ocasiones, una herramienta imprescindible para determinar tensiones y deformaciones de los elementos estructurales, es por esto que todo modelo debe ser correctamente elaborado definiendo secciones, material, geometría, cargas y vínculos, con una correcta calibración del modelo. En este caso una de las complejidades es el análisis de las cargas móviles, precisamente por esta característica y además de transitar en una curva y no en una trayectoria del todo recta.
3. Para cada uno de los esquemas de cargas analizados se determinan las tensiones en los elementos así como las deformaciones en los puntos de interés, esto para cada velocidad de circulación establecida, lo cual permite agrupar y analizar estadísticamente los datos para obtener tendencias y valores medios.
4. En la actualidad la estructura del puente es capaz de resistir las cargas que por él circulan, a velocidades dentro de lo permitido, sin sufrir deformaciones excesivas que atenten contra el buen funcionamiento del mismo y sin incurrir en el fenómeno de la resonancia producto de paso del material rodante.

RECOMENDACIONES

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

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO, I., RODRÍGUEZ-IGLESIAS, V. & FIGUEROA, I. A. J. M. 2015. Potencialidades computacionales del Método de los Elementos Finitos para la modelación y simulación de materiales compuestos: revisión. 20, 293-303.
- BARBERO, J. D. 2001. *Dinámica de puentes de ferrocarril para alta velocidad: métodos de cálculo y estudio de la resonancia*. Asociación Nacional de Constructores Independientes.
- CASTELLANOS-TORO, S., MARMOLEJO, M., MARULANDA, J., CRUZ, A. & THOMSON, P. 2018. Frequencies and damping ratios of bridges through Operational Modal Analysis using smartphones. *Construction and Building Materials*, 188, 490-504.
- COSTA, C., RIBEIRO, D., JORGE, P., SILVA, R., ARÊDE, A. & CALÇADA, R. 2016. Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. *Engineering Structures*, 123, 354-371.
- DÍAZ GARRIDO, L. 2013. *Análisis del comportamiento dinámico de un viaducto ferroviario sobre el Caño el Águila, situado en la línea de alta velocidad Sevilla-Cádiz*. Caminos.
- FERROCARRILES 2003. Itinerario No 14. In: CUBA, M. D. T. F. D. (ed.).
- FERROCARRILES 2012. Suplemento No.3 al Itinerario No.14. In: CUBA, M. D. T. F. (ed.).
- GARCÍA, J. 2015. *Estudio del comportamiento tenso-deformacional de suelos parcialmente saturados en Cuba* [Online]. [Accessed].
- GARCÍA, J. M. 2017. *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas con VENSIM PLE*, Juan Martín García.
- GONZÁLEZ ARESTUCHE, L. & RECONDO PÉREZ, R. 2009. *Puentes de Matanzas*.

- LIN, W. & YODA, T. 2017. Chapter Four - Loads and Load Distribution. *In: LIN, W. & YODA, T. (eds.) Bridge Engineering*. Butterworth-Heinemann.
- LIZARZA, J. T. C. 2000. *Método de los elementos finitos para análisis estructural*, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Navarra.
- MAJKA, M. & HARTNETT, M. 2008. Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles. *Computers & Structures*, 86, 556-572.
- MÖLLER, D. P. 2014. *Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation*, Springer.
- NORMALIZACIÓN, N. C. S. 2017. Requisitos Básicos para Diseño y Construcción.
- NORMALIZACIÓN, N. J. M. D. C. 2003. 285 Carga de viento.
- PERALTA, J. A., REYES, P. & MUÑOZ, A. G. J. L.-A. J. O. P. E. 2009. El fenómeno de la resonancia. 3, 18.
- PÉREZ, H. A. 2018. INFORME DE PRUEBA DE CARGA PARA PUENTE DUBROCQ. Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería, EMPAI Matanzas.
- PÉREZ, H. A., DELGADO, P. H. & ARESTUCHE, L. R. G. 2012. Informe preliminar de las afecciones del puente Dubrocq, sobre el río Yumurí, en el ferrocarril de acceso al puerto, ciudad de Matanzas. Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería de Matanzas EMPAI.
- PÉREZ, H. A., DELGADO, P. H. & ARESTUCHE, L. R. G. J. R. A. E. I. 2013. Reparación Puente de Ferrocarril Dubrocq. 7, 4-12.
- PÉREZ, H. A., GÓMEZ PILOTO, E. & ARMAS, N. D. J. R. D. A. E. I. 2006. Análisis Estructural de un Puente en la Autopista Matanzas-Varadero. Modelación y Análisis de su Capacidad.

- RAMÍREZ DÍAZ, R., GÁMEZ BRETO, Y., PÉREZ LECUSAY, H. & CHAGOYÉN MÉNDEZ, E. J. O. Y. P. 2015. Evaluación de un puente de vías férrea mediante ensayos estructurales y modelación computacional. 32-43.
- RAO, S. S. 2012. *Vibraciones Mecánicas* (5a edición) Pearson Educación. México.
- RIBEIRO, D., CALÇADA, R., DELGADO, R., BREHM, M. & ZABEL, V. 2012. Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. *Engineering Structures*, 40, 413-435.
- RODRÍGUEZ CASTELLANOS, M. 2010. *Modelación estructural de un puente metálico ferroviario de viga continua*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- RODRÍGUEZ CRUZ, A. A. 2016. *Métodos para el análisis dinámico de puentes frente a cargas móviles*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- SCHNEIDER, S. & MARX, S. 2018. Design of railway bridges for dynamic loads due to high-speed traffic. *Engineering Structures*, 174, 396-406.
- SIRCOVICH-SAAR, O. 2006. *Dynamics in the practice of structural design*, WIT Press.
- SUCH, M., JIMENEZ-OCTAVIO, J. R., CARNICERO, A. & SANCHEZ-REBOLLO, C. 2015. Simulación de cargas móviles sobre estructuras mediante un mallado móvil de elementos finitos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 31, 212-217.
- WU, J.-J., WHITTAKER, A. R. & CARTMELL, M. P. 2000. The use of finite element techniques for calculating the dynamic response of structures to moving loads. *Computers & Structures*, 78, 789-799.