

**Universidad de Holguín
“Sede Oscar Lucero Moya”
Facultad de Ingeniería
Departamento de Construcciones**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CARGA
VERTICAL MÓVIL PARA PUENTES DE
CARRETERA DE TIPOLOGÍA CUBANA,
UTILIZANDO DATOS DE AFOROS MANUALES**

Autora: MIRTHA JUANA GUILLÉN SÁNCHEZ

**Holguín
2016**

Universidad de Holguín
“Sede Oscar Lucero Moya”
Facultad de Ingeniería
Departamento de Construcciones

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**CALIBRACIÓN DEL MODELO DE CARGA
VERTICAL MÓVIL PARA PUENTES DE
CARRETERA DE TIPOLOGÍA CUBANA,
UTILIZANDO DATOS DE AFOROS MANUALES**

Autora: MIRTHA JUANA GUILLÉN SÁNCHEZ

Tutor: Ing. Eddy Fernández Ochoa

Holguín
2016

Pensamiento

Los detalles no son los detalles. Los detalles son el diseño.

Charles Eames

Dedicatoria

A mis abuelos Chino y Luis, por todo su amor y confianza en mí.

Agradecimientos

A mis padres, hermanos y abuelas.

A toda mi familia en especial a mis sobrinos Rafitín y Lucas y a mis primos Roly, Leiner y Adrián por todo su cariño y ayuda.

A mi Luisi por él sabe por qué.

A mis amigos de siempre Carlos Félix, Jesús, Lisbeth, Yani, Yady, Ana Sonia, Mary, Oel, Ilka, Daniel, Ailín, Yousy, Luisito, Oscar y Yoco.

A mi familia por parte de novio por todo su apoyo.

A mi tutor gracias por su paciencia, ayuda y apoyo durante los últimos tres años de la carrera.

A todos mis compañeros de aula por ser ellos siempre.

A todos los profesores que han contribuido a mi formación académica y moral.

RESUMEN

El diseño de puentes de carreteras se rige por lo dispuesto en normas, estas presentan peculiaridades dependiendo su país de aplicación. Una de las singularidades más notables son los modelos de cargas vivas o vertical móvil dado que estos describen principalmente las características del tráfico de la zona y son cambiantes de un lugar a otro.

En Cuba se han adoptado tanto criterios como modelos de carga de normativas de origen estadounidense. Cabe suponer que pueden existir diferencias entre las solicitudes causadas por el tráfico cubano y las originadas por el modelo importado; trayendo consigo problemas en de seguridad en el diseño y servicio de los puentes cubanos. La presente investigación se propuso resolver tal situación. Primeramente se realizó un estudio para determinar las regularidades en la determinación de un modelo de carga vertical móvil. Luego contando con datos de tráfico recolectados en el país en los años 2011 y 2012 se generó un modelo representativo de las características de dicho tráfico.

El modelo obtenido posee una carga distribuida de 15 KN/m y una concentrada de 140KN, este modelo es superior al modelo normado en 71.5% para la carga concentrada y 57.56% para la carga distribuida.

Abstract

The design of bridges of roads is governed for what's disposed in standards, these present peculiarities depending his country of application. The models of live loads or movable vertical granted that these describe the characteristics of the traffic of the zone principally and are changing from one place to another are a one belonging to the most notable singularities.

In Cuba have adopted him so much criteria like charging models of ground ruleses of North American origin. It is pertinent to suppose than can exist you tell Cuban apart between the solicitations caused by traffic and the originated for the cared about model; bringing problems along in of certainty in the design and service of the bridges Cubans. Present it investigation proposed resolving such situation itself. Firstly a study to determine the regularities in the determination of a model of vertical movable load came true. Next counting on data of traffic once 2011 were recollected at the country in the years and a representative model of the characteristics of the aforementioned traffic generated 2012 itself.

The obtained model possesses a load distributed of 15 KN m and one concentrated of 140KN, this model is superior to the model of the standard in use in 71,5 % for the concentrated load and 57,56 % for the distributed load.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS DE CARGA VERTICAL PARA PUENTES DE CARRERERA.	6
Introducción al capítulo.....	6
I.1 Modelos de carga vertical en diferentes normativas.....	6
I.1.1 Norma Cubana	6
I.1.2 American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO)	10
I.1.3 Normas Latinoamericanas.....	12
I.1.4 Eurocódigo 1 parte 2.....	15
I.2 Variables que determinan un modelo de carga vertical para puentes de carretera	19
I.3 Modelos de cargas verticales	23
I.3.1 Modelo de Nowak e Lind (1979)	23
I.3.2 Modelo de Moses e Ghosn (1985)	25
I.3.3 Modelo de Nowak (1999)	26
I.3.4 Modelo de Crespo-Minguillón y Casas (1997)	29
I.3.5 Modelo de Hwang y Koh (2000)	29
I.4 Modelos de carga vertical móvil desarrollados en Cuba	30
I.4.1 Peculiaridades del parque vehicular cubano.....	30
I.4.2 Modelos de carga vertical móvil desarrollados en puentes de tipología cubana ..	32
Conclusiones del capítulo	33
CAPÍTULO II. OBTENCIÓN DE UN MODELO DE CARGA VERTICAL MÓVIL, CORRESPONDIENTE A UNA CARGA DE CARRIL.	34
Introducción al capítulo.....	34
II.1 Procedimiento para la obtención del modelo.....	34
II.2 Selección de los sistemas estructurales representativos.....	36
II.2.1 Descripción de la tipología cubana para puentes de carretera. Proyecto del MICONS. 36	
II.2.2 Selección del prototipo de puente.....	37
II.2.3 Descripción del prototipo de puente seleccionado.....	38
II.3 Construcción del modelo numérico del prototipo.	39
II.4 Simulación de las situaciones del tráfico.....	44
II.5 Obtención de las solicitudes.....	47

II.6	Tratamiento estadístico de las solicitaciones obtenidas.	50
II.6.1	Extrapolación de los efectos.	52
II.7	Obtención del modelo.	54
II.8	Comparación entre el nuevo modelo obtenido y el vehículo normado MS – 32.	56
II.9	Consideraciones para el uso del nuevo modelo de cargas verticales móviles para el diseño de puentes de carretera obtenido.	56
	Conclusiones del capítulo	57
	CONCLUSIONES GENERALES	58
	RECOMENDACIONES	59
	BIBLIOGRAFÍA	60
	ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

“Un puente no puede considerarse como una estructura independiente, sino que forma parte de otra obra, una carretera o una vía férrea, la cual realiza una función específica: dar paso a las aguas de una corriente, cruzar sobre otra vía o salvar un vano. De lo dicho anteriormente se desprende que un puente está condicionado por las características de la vía, es decir, la ubicación, alineación, altura y características del tráfico; todo lo que hace que se requieran estudios específicos que aseguren que el puente funcione adecuadamente en el conjunto de la obra” (1).

Los componentes principales de carga de puentes de carreteras son la carga muerta, la carga viva (estática y dinámica), cargas medioambientales (temperatura, el viento) y otras cargas (la colisión, el frenado de emergencia). La combinación básica de carga para puentes de carreteras es una ocurrencia simultánea de peso muerto, carga viva y carga dinámica.

“La carga viva cubre un rango de fuerzas producidas por vehículos moviéndose en el puente. El efecto de carga viva depende de muchos parámetros incluyendo las cargas de intervalo de longitud de los vehículos, peso de los vehículos, ejes de los vehículos, configuración del eje, posición del vehículo en el puente (transversal y longitudinal), número de vehículos en el puente, frecuencia, espaciamiento de vigas y la rigidez de los miembros estructurales (tablero y las vigas)” (2).

El desarrollo del modelo de carga viva es esencial para un diseño racional de puentes y el código de evaluación de estos. “Los modelos de carga desarrollados para puentes de carretera se basan en datos estadísticos disponibles en cargas muertas, cargas vehiculares y cargas dinámicas” (3). El modelo puede ser expresado de dos formas: una de ellas es un vehículo específico conocido como vehículo de diseño descrito por su peso, dimensiones y otras observaciones; la otra

1 Taylor, Lazo, L y Rodríguez. Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de Hormigón Estructural, 2006

2 Nowak. Structural Safety, 1993. Cap.13, p.53-66.

3 Nowak. Structural Safety, 1993. Cap.13, p.53-66.

forma es una línea de diseño o carga sustitutiva según la norma cubana; que consiste en una carga distribuida y un número variable de cargas concentradas, es importante entender que estas cargas no son diseñadas para un vehículo o combinación de vehículos, sino que reflejan un espectro de cargas y sus efectos asociados.

La Norma Cubana de requisitos de diseño y métodos de cálculo de carreteras, puentes y alcantarillas del 2009, NC 733:2009, establece que: “Para los puentes de autopistas, carreteras y urbanos el diseño se realizará con el vehículo MS-32 y con el vehículo NK-80 de acuerdo a las disposiciones establecidas en la presente norma” ⁽⁴⁾.

El vehículo MS-32 proviene de la norma estadounidense AASHTO.

“Es importante destacar que no existe estructura totalmente segura: imprecisiones que se salen del control de los proyectistas hacen que exista un riesgo inherente”. El objetivo de las precisiones establecidas en normas no es garantizar una seguridad absoluta, es admitir un riesgo aceptable, consistente con las necesidades económicas y de seguridad. ⁽⁵⁾

El vehículo de diseño que deberá considerarse en el diseño de puentes de carreteras será un vehículo representativo de las condiciones locales y específicas de un determinado diseño. Los modelos de carga vehicular MS-32 y NK-80 utilizados actualmente en nuestro país no se corresponden con las características del tráfico cubano, lo que puede traer consigo problemas de seguridad en el diseño de estas obras ingenieriles. Por tanto, es necesario partiendo de las características del tráfico cubano adoptar criterios eficientes y confiables para la determinación real de un modelo de carga móvil para el diseño de estas estructuras.

Dadas las anteriores argumentaciones surge la necesidad de la presente investigación. La misma pretende obtener un modelo de carga vertical móvil a partir del análisis de solicitaciones generadas en un puente de hormigón armado por

⁴ Norma Cubana de requisitos de diseño y métodos de cálculo de carreteras, puentes y alcantarillas NC 733:2009, 2009. Cap.7, p.25-38.

⁵ MOSES, F. (1999): Bridge reliability concepts and methods. In: FRANGOPOL, D.M.(Ed). Bridge safety and reliability. Reston: ASCE. Cap.1, p.1-22.

secuencias vehiculares. Dichas secuencias están basadas en datos de tráfico recolectados en el enlace vial Holguín–Moa, en la Carretera Central vía a Bayamo y en el Anillo Circunvalante. Los aforos se realizaron durante dos años siguiendo el método indirecto modificado y aportaron datos relativos a las peculiaridades de circulación vial en Holguín.

Atendiendo a las anteriores argumentaciones se declara el siguiente **problema investigación**: las solicitudes resultantes de la aplicación los modelos de carga vertical móvil propuestos en la NC 733:200 no se corresponden con las solicitudes generadas por el parque vehicular cubano.

El **objeto de investigación** lo constituyen los puentes de tipología cubana y el **campo de investigación**: lo constituyen los modelos de cargas verticales móviles para puentes de carretera.

El **objetivo general** de la investigación es: obtener un modelo de carga vertical móvil para puentes de carretera de tipología cubana.

Los objetivos específicos son

- Revelar los antecedentes históricos y referentes teóricos del empleo de modelos de carga vertical móvil para puentes de carretera.
- Analizar los modelos de carga vertical móvil obtenidos anteriormente en puentes de tipología cubana.
- Crear un modelo de cargas verticales móviles para puentes de carreteras con el cual se obtengan solicitudes equivalentes al parque vehicular cubano.
- Comparar las solicitudes generadas por el nuevo modelo de carga vertical móvil con las obtenidas por el vehículo MS-32 de la norma NC 733:2009.

Para el cumplimiento del objetivo general se plantean las siguientes **Preguntas de investigación**:

- ¿Cuáles los antecedentes históricos y referentes teóricos del empleo de modelos de carga vertical móvil para puentes de carretera?

- ¿Qué caracteriza a los modelos de carga vertical móvil obtenidos anteriormente en puentes de tipología cubana?
- ¿Cómo Crear un modelo de cargas verticales móviles para puentes de carreteras con el cual se obtengan solicitaciones equivalentes al parque vehicular cubano?
- ¿Cómo se comportan las solicitaciones generadas por el nuevo modelo de carga vertical móvil con respecto las obtenidas por el vehículo MS-32 de la norma NC 733:2009?

A partir de las preguntas de investigación formuladas se trazan las **Tareas de Investigación**:

- Determinación los antecedentes históricos y referentes teóricos del empleo de modelos de carga vertical móvil para puentes de carretera.
- Revisión de los modelos de carga vertical móvil obtenidos anteriormente en puentes de tipología cubana.
- Creación de un modelo de cargas verticales móviles para puentes de carreteras con el cual se obtengan solicitaciones equivalentes al parque vehicular cubano.
- Comparación de las solicitaciones generadas por el nuevo modelo de carga vertical móvil con las obtenidas por el vehículo MS-32 de la norma NC 733:2009.

Métodos teóricos:

Histórico-lógico: Este método es esencial para el análisis evolutivo del uso de modelos de cargas verticales móviles para puentes de carreteras.

Análisis-Síntesis: Es utilizado para descomponer a los modelos de carga vertical móvil para puentes de carretera en su historia, antecedentes y a partir de este análisis arribar a un conocimiento resultante.

Abstracción y generalización: Se emplea al asumir definiciones y criterios de estudiosos del tema para la obtención del modelo de cargas verticales.

Modelación: Se usó para elaborar el modelo estructural del puente seleccionado utilizando el programa computacional CSi Bridge V15.

Método empírico:

Análisis documental: Se utilizó analizar históricamente el campo de investigación.

Método estadístico – matemático:

Estadístico descriptivo: El método permite organizar y presentar las informaciones derivadas de la extrapolación de los efectos para los períodos de retornos analizados según los histogramas de frecuencia.

El aporte de la investigación es: un modelo de carga vertical móvil para puentes de carretera de tipología cubana.

La novedad científica radica en el empleo de los Software profesionales CSiBridge de modelación y diseño de puentes y Statgraphics Centurion XV de análisis estadístico. El software CSiBridge será utilizado para la elaboración del modelo numérico del prototipo del puente y para simular la acción de las secuencias de tráfico sobre el mismo. Mientras que el Statgraphics se empleará para el procesamiento estadístico de los resultados de la simulación.

Actualidad del tema de la investigación: el modelo de cargas vertical obtenido será utilizado posteriormente en el proyecto de investigación que desarrolla el Ing. Eddy Fernández Ochoa como parte de su tesis de maestría en el tema de Ingeniería Civil en Zonas Sísmicas aplicada a puentes de carretera.

Estructura del informe de la investigación: El informe de la investigación está estructurado por dos capítulos. En el primero se muestra los resultados de la caracterización histórica, teórico – metodológica de los modelos de carga vertical de puentes de carretera. En el segundo capítulo se exponen el procedimiento y los resultados de la obtención del modelo de carga móvil para puentes de tipología cubana.

CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS DE CARGA VERTICAL PARA PUENTES DE CARRERERA.

Introducción al capítulo

En el presente capítulo se analizan la evolución de los modelos de carga vertical en diferentes normativas y las metodologías para obtenerlos. También se abordan las principales variables a tener en cuenta en la elaboración de un modelo de carga vertical móvil, así como se exponen los modelos elaborados a partir de estudios en puentes de tipología cubana.

I.1 Modelos de carga vertical en diferentes normativas

I.1.1 Norma Cubana

Antes del triunfo de la Revolución, en Cuba, las normas empleadas para el diseño de puentes de carreteras eran las ***American Association of State Highways and Transportation Officials*** (AASHTO) de origen estadounidense, luego del 1960 se utilizaron las normas francesas hasta la creación del Comité Nacional de Normas para el cálculo estructural aproximadamente en 1964, según Taylor Hernández (1980). “Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de hormigón”, p.168. En diciembre de 1984 es aprobada por el Comité Estatal de Normalización la norma cubana NC 53:125 Puentes y Alcantarillas, Especificaciones de proyecto y Métodos de cálculo y comienza su aplicación a partir de mayo de 1985, esta establecía que: “para el diseño de los puentes de autopistas, carreteras y vías urbanas se tomarán las cargas características de los vehículos normativos N-30 y el NK-80.”⁶

La carga N-30 estaba formada por un convoy ilimitado de vehículos con un peso de 300 kN cada uno y espaciados longitudinalmente a intervalos de 10 m entre ruedas; sus características se muestran en la siguiente figura:

⁶ NC 53:125 “Puentes y Alcantarillas”. Especificaciones de proyecto y Métodos de cálculo, 1984.

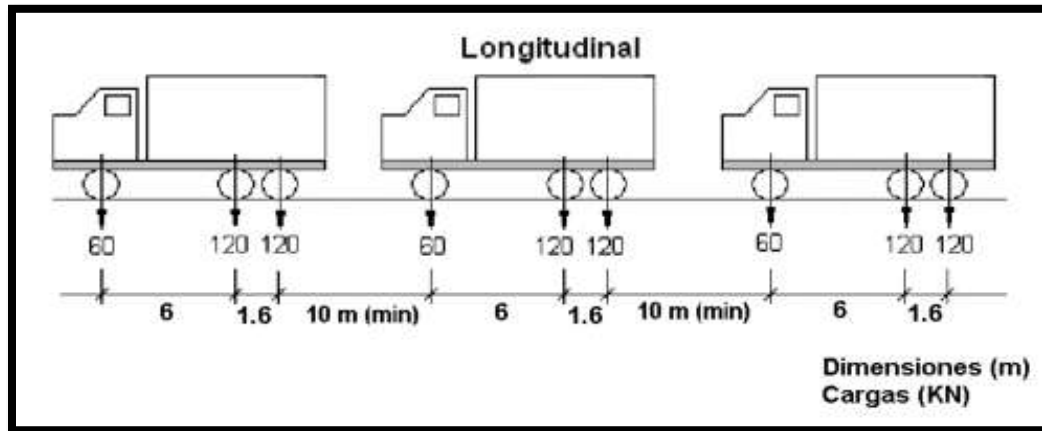


Figura I.1 Carga N-30, Disposición Longitudinal. Fuente: Infante Suárez (2013)

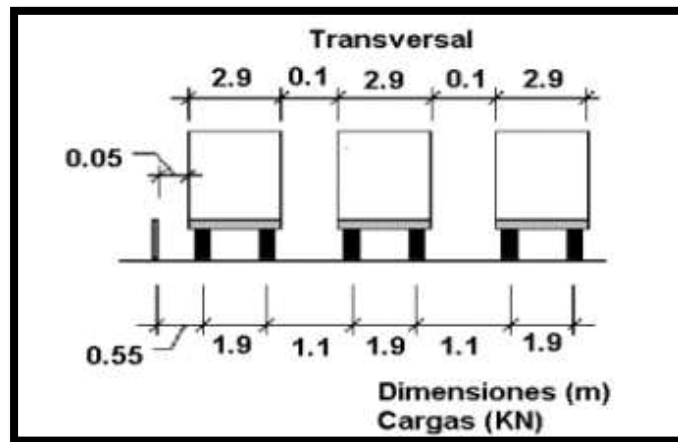
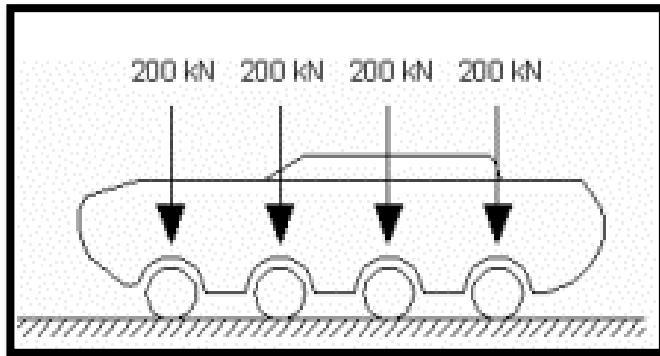


Figura I.2 Carga N-30, Disposición Transversal. Fuente: Infante Suárez (2013)

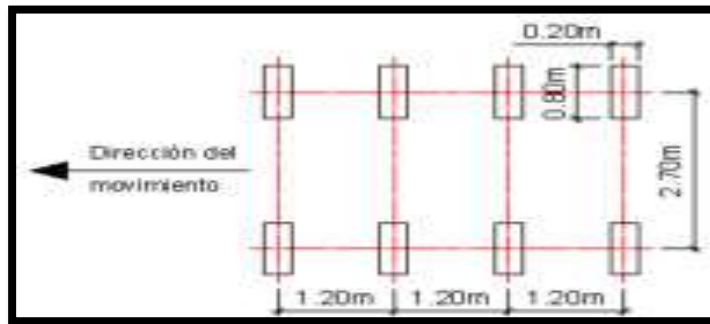
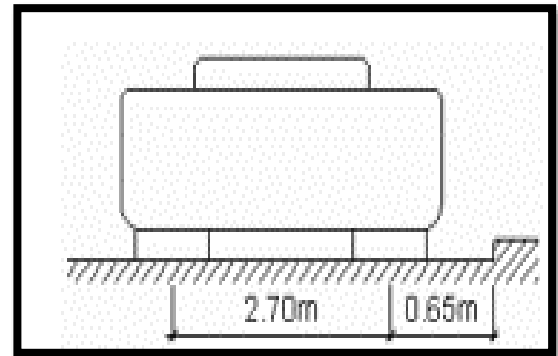
El vehículo NK-80 está constituido por cuatro ejes espaciados a 1.20 metros en la dirección del tránsito. Su peso total es 800 kN.⁷

⁷ NC: 733/2009 "Carreteras-Puentes y Alcantarillas" Requisitos de diseño y métodos de cálculo

Disposición longitudinales



Disposición transversales



Vista Superior

Figura I.3 Características del vehículo NK-80. Fuente: NC: 733/2009

En el año 2009 se elabora por el comité Técnico de Normalización NC/CTN 21 de Carreteras la NC: 733/2009 “Carreteras-Puentes y Alcantarillas” Requisitos de diseño y métodos de cálculo, se toma como base para la revisión, la AASHTO **Standard Specifications for Bridges, 17th Edition**. La NC: 733/2009 sustituyó a la NC 53:125 y es la que rige los procesos de diseño y revisión actualmente.

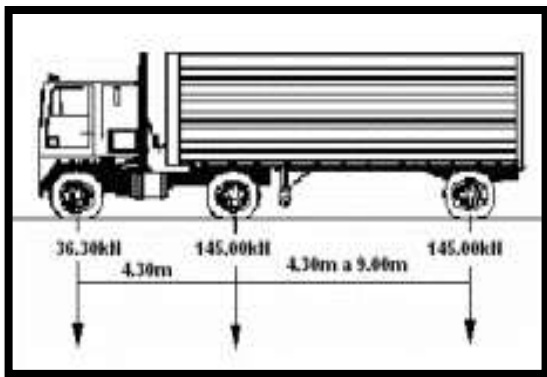
Esta norma establece que el diseño de puentes se realizará con vehículos NK-80, MS-32, o una carga de carril sustitutiva que incluye fuerzas concentradas para los diseños de momento y cortante indistintamente. Para el diseño no se considera la actuación simultánea de los vehículos de diseño. Es de suma importancia destacar que los modelos MS-32 tanto de carga sustitutiva o de carril (Figura I.4) como el que tiene forma de vehículo o cargas puntuales (Figura I.5) son importados de normas la AASHTO; el primero proviene tiene su origen en 1935 y el segundo en 1944.



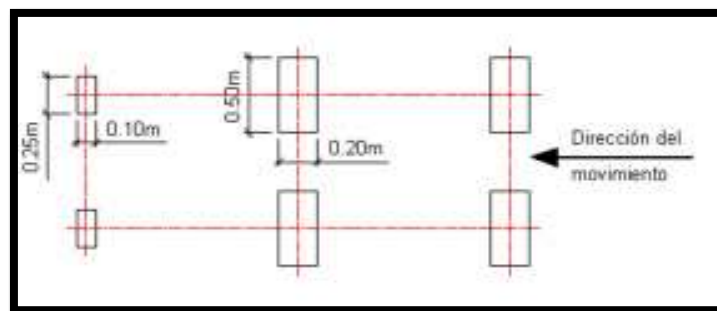
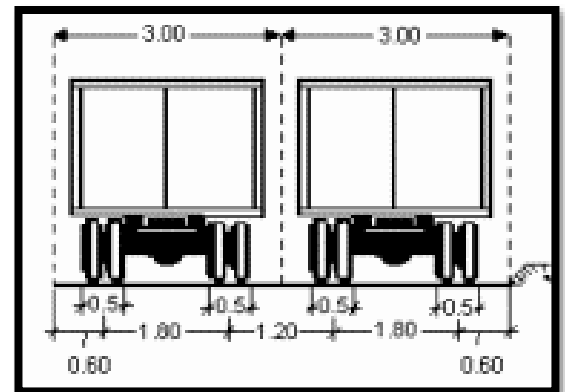
Figura I.4 Cargas distribuidas y concentradas para el MS-32. Fuente: NC: 733/2009

Características del vehículo MS-32:

Dimensiones longitudinales



Dimensiones transversales



Vista en Planta

Figura I.5 Características del Vehículo MS-32. Fuente: NC: 733/2009

I.1.2 American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO)

La American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO) contiene las especificaciones que se utilizan en proyectos de puentes de los Estados Unidos de América. Esta norma clasifica a los vehículos pesados en dos clases principales: los denominados con la letra H seguida de un número y los designados con las letras HS, seguidas también de caracteres numéricos. Los camiones de tipo H tienen solo dos ejes y los denominados HS son vehículos tipo, con tractor y semirremolque, es decir, tres ejes.

A continuación se muestra cada uno de estos vehículos:

a) Vehículos H.

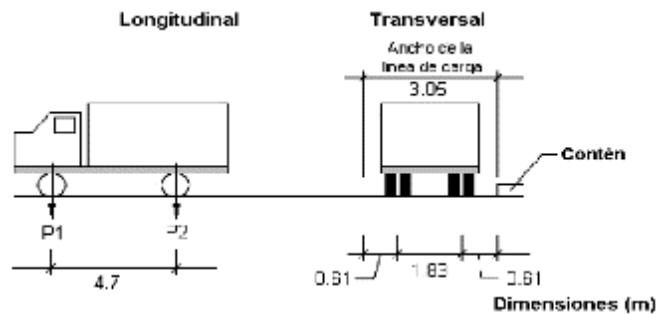


Figura I.6 Vehículos H. Fuente: Infante Suárez (2013)

Tabla I.1. Cargas por eje Para los vehículos H Infante Suárez (2013)

Vehículos	P1 (kN)	P2 (kN)
H 15 - 44	27.2	108.8
H 20 - 44	36.3	145.2

b) Vehículos HS.

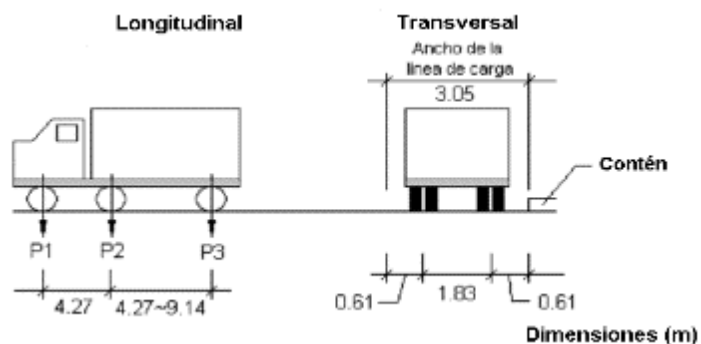


Figura I.7 Vehículos HS. Fuente: Infante Suárez (2013)

Tabla I.2. Cargas por eje Para los vehículos HS Infante Suárez (2013)

Vehículos	P1 (kN)	P2 (kN)	P3 (kN)
HS 15 - 44	27.2	108.8	108.8
HS 20 - 44	36.3	145.2	145.2

Fuente: Elaboración propia

Carga del carril de diseño

Consiste en una carga uniforme por metro lineal de vía de tránsito, combinada con una carga concentrada colocada en posición tal que provoque los máximos esfuerzos.

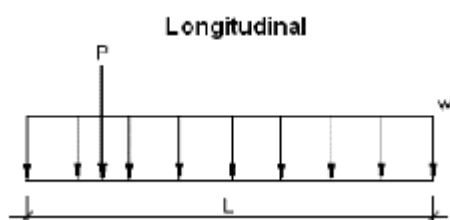


Figura I.8 Carga de carril. Fuente: Infante Suárez (2013)

Tabla I.3. Valores de carga concentrada (P) y carga equivalente (w). Infante Suárez (2013)

Vehículo	Carga concentrada P (kN)		W (kN/m)
	Para momento	Para cortante	

H 15-44	61.2	88.5	7.14
HS 15-44			
H 20 – 44	81.7	117.9	9.52
HS 20 - 44			

Especificaciones AASHTO (LRFD)

La AASHTO (LRFD) se definen tres tipos de carga: carga de camión, consta de un camión de diseño similar al HS 20-44 de la AASHTO (Estándar); carga de faja de 9.3 kN/m distribuida uniformemente en dirección longitudinal y transversalmente se asume distribuida sobre un ancho de 3m y carga de tándem que consiste en un par de ejes de 110 kN con una separación de 1.2 m y. espaciamiento transversal de las ruedas de 1.8 m.

La sobrecarga vehicular sobre las calzadas de puentes, designada como HL-93, deberá consistir en una combinación de:

- Carga de Camión + Carga de faja
- Carga de Tándem + Carga de Faja

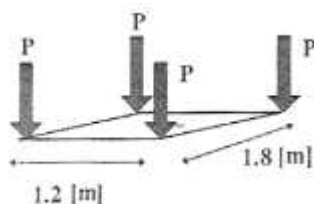


Figura I.9 Cargas de tándem. Fuente: AASHTO (2004)

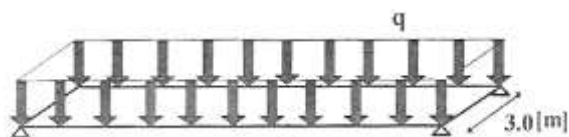


Figura I.10 Cargas de faja. Fuente AASHTO (2004)

I.1.3 Normas Latinoamericanas

En los países latinoamericanos, en un principio, los puentes de carreteras fueron diseñados cumpliendo con los criterios expuestos en la AASHTO. Actualmente esta norma se sigue utilizando en países como Chile, pues este no cuenta con una normativa nacional de puentes. (Infante Suárez, 2013)

Estudios realizados en Perú demostraron que las solicitaciones generadas por el modelo de carga viva de AASHTO eran mucho menores que las producidas por los vehículos que realmente circulaban por las vías del país. Los resultados arrojaron que las solicitaciones de los vehículos reales estaban en el orden de un veinte a un veinticinco por ciento más grandes que las de los vehículos estipulados por la AASHTO. Ante este problema se tomó como primera medida la adopción de la norma francesa para el diseño de puentes de carreteras, pero esto trajo consigo un sobre diseño de estas estructuras. Ante esta nueva problemática se tomó como reglamento para el diseño la AASHTO (LRFD), y actualmente se continúa diseñando según esta norma. (Ramírez Rodríguez 2015)

En investigaciones realizadas en México sobre los años noventa se reafirmó la necesidad de crear un modelo de cargas vivas vehiculares pues al comparar los momentos y cortantes máximos representados por los vehículos más pesados del país con las solicitaciones generadas por los vehículos del reglamento de la AASHTO estas últimas resultaron ser muy inferiores demostrándose la necesidad de derogar la AASHTO e implementar un nuevo reglamento.

En el año 1993 y 1996 son recopilados por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte para el diseño estructural de puentes de carreteras (SCT) los datos sobre pesos y dimensiones de vehículos de cargas representativos del país para el desarrollo de dicho modelo, que quedaría conformado en el año 2004 por dos modelos de cargas vivas: uno para carreteras principales, tipos ET, A, B y C; y otro para alimentadoras, tipo D en la formulación de la nueva norma mexicana. Según la Norma Mexicana SCT de Cargas Vivas 2004, pág. IX

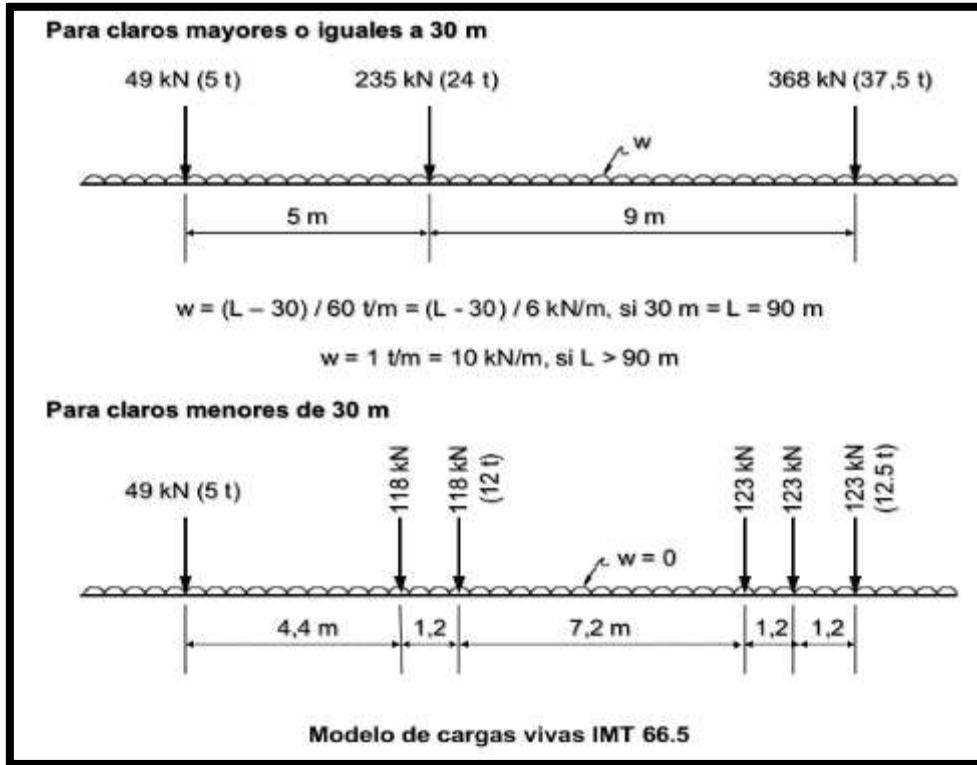


Figura I. 11 Modelos de cargas vivas IMT 66.5. Fuente: Instituto mexicano del transporte. – Secretaria de comunicaciones y transportes.

Para ambos modelos se comprenden un sistema de cargas concentradas, y uno de carga uniformemente distribuida, donde se toma como punto de partida que todos los modelos que se incluyen en los reglamentos de otros países se consideran los dos sistemas de cargas antes mencionado. Dichos modelos se denominaron IMT 66.5 para carreteras principales e IMT 20.5 para carreteras alimentadoras:

El modelo para carreteras alimentadoras se denomina IMT 20.5 en la norma, y se formuló con igual metodología que el IMT 66.5, pero considerando que los vehículos más grandes que pueden transitar por ellas son los tipo C3, se concibió con dos ejes virtuales de carga.

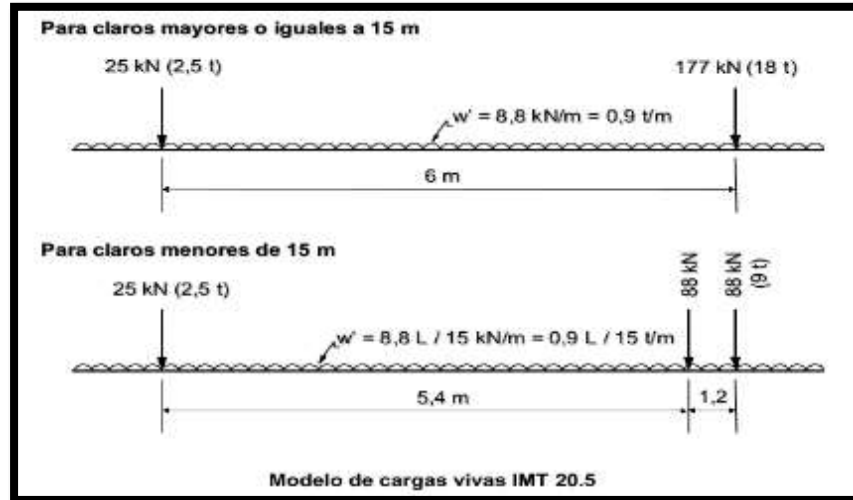


Figura I. 12 Modelos de cargas vivas IMT 66.5. Fuente: Instituto mexicano del transporte. – Secretaria de comunicaciones y transportes.

I.1.4 Eurocódigo 1 parte 2

“El Eurocódigo es la norma que rige el diseño de puentes en Europa y dicha norma, define dos tipos de acciones para el diseño de puentes, las variables y las accidentales. En el caso de los puentes de carreteras se consideran solo las acciones variables, que son definidas como: el uso de modelos de cargas verticales, en condiciones normales (es decir no accidentales), correspondientes a los vehículos que circulan por la vía y a los peatones que también transitan por esta. Para la verificación de fatiga se proponen modelos específicos, valores asociados y, cuando sea necesario condiciones particulares en puentes de carretera.”⁽⁸⁾

“En esta norma de diseño consideran situaciones de proyecto e identifica la hipótesis crítica de carga. De aquí que los modelos de cargas considerados en el Eurocódigo pretenden cubrir todas las situaciones de diseño.”⁽⁹⁾

“Las cargas de tráfico que se estiman comprenden coches, camiones y vehículos especiales, donde estas producen fuerzas horizontales, verticales, estáticas y

⁸ Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. 2012. (Pg. 22).

⁹ Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3. Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 23).

dinámicas. Por lo que los modelos que se definen en este código representan el tráfico actual, aunque también se tienen modelos de cargas complementarios cuando sea necesario considerar un tráfico fuera del campo de aplicación de los modelos ya especificados.”⁽¹⁰⁾

“En el caso particular del uso de los modelos de cargas se adapta a la localización del puente y para cada comprobación individual. Los modelos de cargas deben aplicarse en la longitud y localización longitudinal que produzca los efectos más desfavorables, y las acciones características se definen para la determinación de los efectos del tráfico asociados con la verificación de los Estados Límites Últimos y de determinados Estados Límites de Servicio.”¹¹

En el Eurocódigo se definen 4 modelos de carga vertical para puentes de carretera para la representación de los efectos del tráfico. Estos efectos son representativos de las solicitaciones que generan en la estructura peatones y vehículos.

Modelo de carga 1: Cargas concentradas y uniformemente distribuidas, que cubren la mayoría de los efectos del tránsito de coches y camiones. Este sistema de cargas está definido para comprobaciones locales y generales.

El sistema principal de carga consta de dos sistemas parciales:

a) Cargas concentradas en un eje doble (sistema tándem TS) los ejes tienen un peso

$P = \alpha_Q * Q_{ik}$ y dimensiones que se muestran en el esquema siguiente.

En la norma se establece que no se considera para estas situaciones de diseño más de un sistema tándem por carril, y que solo se considerarán tándem completo.

Además se establece que cada sistema tándem se ubicará en la situación más desfavorable dentro del carril. Y en este caso la carga por neumáticos será equivalente a:

$$P_{neumt.} = 0.5 * \alpha_Q * Q_k.$$

¹⁰ Tomado de: Euro código 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3. Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 23 – 24).

¹¹ Tomado de: Eurocódigo 1- Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3 - Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 25).

La superficie de contacto de cada neumático se considera como un cuadrado de 0.40m de lado.

Cargas uniformemente distribuidas (sistema UDL), de valor por metro cuadrado:

$$P = a_Q * q_k$$

Estas cargas deben aplicarse, según la presente norma, solo en las zonas desfavorables de la superficie de influencia, longitudinal y transversalmente.

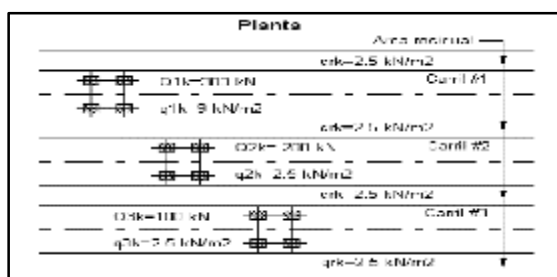
Este modelo se debe aplicar en cada carril teórico y en áreas residuales; en el carril teórico, la magnitud de la carga es igual a: $a_{Qi} * Q_{ik}$ y $a_{Qi} * q_{ik}$; y en las áreas residuales la magnitud de la carga es $a_{qr} * q_{rk}$.¹²

La amplificación dinámica está incluida en los valores de Q_{ik} y q_{ik} . Los valores de Q_{ik} y q_{ik} , se definen en la tabla siguiente:

Tabla I.4 Valores básicos. Fuente: Eurocódigo 1 (1998).

Situación	Sistema tándem Cargas por eje Q_{ik} (kN)	Sistema UDL q_{ik} o q_{rk} (kN/m^2)
Carril #1	300	9
Carril #2	200	2.5
Carril #3	100	2.5
Resto de carriles	0	2.5
Área residual q_{rk}	0	2.5

Figura I.13 Modelo de carga 1. Fuente: Eurocódigo 1 (1998).



Modelo de carga 2: Este modelo representa una carga de un eje simple, aplicada en un área específica de contacto de la rueda, que cubre los efectos dinámicos del

¹² Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3 - Acciones del tráfico en el puente. 2012 (Pg. 27 y 28).

tráfico normal en elementos estructurales muy cortos. Este modelo debe ser considerado aisladamente y solo se utiliza en comprobaciones locales.¹³

El mismo consiste en la carga de un eje simple $P = \beta_Q * Q_{ak}$, con Q_{ak} igual a 400kN, incluyendo la amplificación dinámica, que puede ser aplicada en cualquier lugar de la plataforma. Sin embargo, cuando proceda se puede considerar solo una rueda de 200 kN. β_Q es igual α_{Q1} , salvo en especificaciones que indiquen lo contrario.

El área de contacto de la rueda se tomará igual a un rectángulo de 0.35 m por 0.60 m, como se indica en la figura I.14, o en caso de que se especifique lo contrario se tomará la misma área de contacto que se especifica en el modelo 1.¹⁴

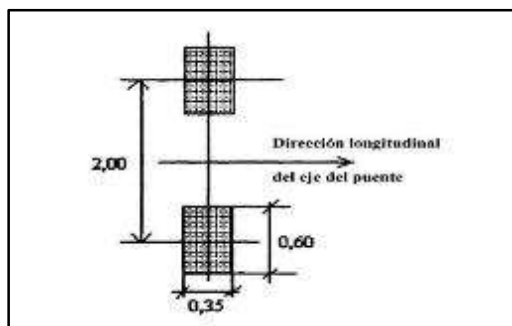


Figura I.14 Modelo de carga 2. Fuente: Eurocódigo 1 (1998).

Modelo de carga 3: Un conjunto de cargas de ejes que representan vehículos especiales (por ejemplo, para transporte industrial) que pueden viajar por carreteras específicamente autorizadas para cargas especiales. Este modelo está definido para ser utilizado solamente cuando se requiera, para comprobaciones locales y generales. El peso máximo de estos vehículos establecido en la norma es de 3600kN como resultado de la combinación de ejes de 150 kN, 200 kN o 240 kN.¹⁵

¹³ Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3 - Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 27).

¹⁴ Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3 - Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 30).

¹⁵ Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3 - Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 27).

Modelo de carga 4: La carga de una muchedumbre. Este modelo debe ser considerado solo cuando la propiedad lo requiera.¹⁶

I.2 Variables que determinan un modelo de carga vertical para puentes de carretera

“Los máximos efectos sobre los puentes producto a las cargas móviles se producen debido a la presencia simultánea de varios camiones pesados. Cada evento de sobrecarga en los puentes está caracterizado por el número de camiones y su posición relativa, su peso bruto y el peso y espaciamiento de sus ejes. De ahí que estas sean variables de mucha importancia y a tener en cuenta para la obtención de un modelo de cargas vivas móviles. De esta forma, todos los factores mencionados son variables aleatorias que precisan ser tomados en consideración para el cálculo del efecto máximo que produce un modelo de cargas vivas sobre dichas estructuras.”⁽¹⁷⁾

Otras variables a tener en cuenta son: la distancia entre vehículos, velocidad, crecimiento del tránsito, geometría del puente y longitud de carga. Estas variables unidas a las mencionadas anteriormente están determinadas por manuales técnicos de distintas disciplinas.

- Número de camiones

El número de camiones como variable aumenta con el paso del tiempo debido al aumento del tráfico y a las nuevas legislaciones. Se determina promediando la intensidad diaria de tráfico, dato que es determinado mediante conteos vehiculares.

“Se tiene que destacar que previéndose un posible crecimiento en el peso y el volumen del tráfico a lo largo de la vida útil de la estructura, hay autores como Moses

¹⁶ Tomado de: Eurocódigo 1 - Base de proyecto y acciones de estructuras. Parte 3 - Acciones del tráfico en el puente. 2012. (Pg. 27).

¹⁷ Tomado de: Maldonado Ferreira, Luciano, “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”. Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Brasil, 2006. (Pg. 36).

y Ghosn (1986) que consideran un factor de crecimiento promedio de 1.15 y coeficiente de variación del 10% por el estudio de tendencias de crecimiento.”⁽¹⁸⁾

- **Peso bruto**

“El tránsito de vehículos pesados con mayor frecuencia y el exceso de peso en los puentes tiende a acelerar el deterioro de los elementos estructurales, por tanto el control del peso de los vehículos a través de las limitaciones en las cargas por eje es el principio fundamental para conservar la integridad de los puentes.”⁽¹⁹⁾

El Peso Bruto Total (PBT), para los vehículos no articulados está definido por la suma algebraica de las cargas máximas permitidas en todos sus ejes componentes. Cuando se trata de vehículos articulados el Peso Bruto Total Combinado (PBTC) parte de la misma definición lo que valiéndose para todos los ejes de combinación. Esta variable influye directamente en el modelo de la carga móvil, debido a que el peso es uno de los principales factores que generan el esfuerzo vertical en puentes.

- **Peso por ejes**

Tras el análisis del peso bruto se estudian los pesos por ejes que inciden en el modelo, ya que cada configuración presenta un tipo de eje. Los ejes pueden ser simples o tandem según la clasificación que establece la norma cubana de pavimento NC 334:2004 en el espectro de cargas, aunque existen otros circulando por el país como los ejes tridem que no contempla la norma. Además se identifican por sus neumáticos. En general existen ejes simples con ruedas simples (ESRS) y duales (ESRD) y ejes tandem con ruedas duales y triples.

Otros autores como Rossigali (2006) definen los pesos por eje como:

- eje separado de 2 neumáticos (SRS): 60kN;
- eje separado de 4 neumáticos (SRD): 100kN;
- eje tándem duplo (TD): 170kN;

¹⁸ Carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006.pág. 41

¹⁹ Rossigali, C. “Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil”. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2006, pág. 14

- eje tándem triple (TT): 255kN;
- eje duplo especial (DE): 135kN.

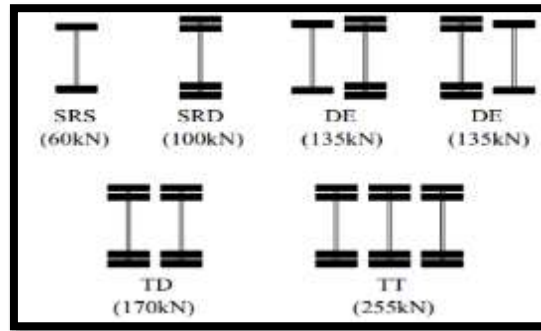


Figura I.15 Peso por ejes. Fuente: Rossigali (2006)

“Estos pesos se distribuyen por ejes generalmente expresados en por ciento, dependiendo del tipo de vehículo y variando con su peso total, por ejemplo: estando vacío, la mayor parte del peso baja por el eje delantero debido a la presencia del motor en la parte delantera de la gran mayoría de los vehículos; a medida que aumenta la carga para un mismo vehículo, el eje trasero se sobrecarga más que el delantero estando lleno.”⁽²⁰⁾

- Espaciamiento entre ejes

La distancia entre ejes varía significativamente para cada vehículo o silueta analizada, ya que depende del tipo de camión del parque vehicular que se estime. Esta variable tiene igual influencia que el peso bruto, pues con ambas se obtienen las solicitaciones más críticas del puente que se tendrán en cuenta para el desarrollo del modelo.

²⁰ Infantes Suárez, Dania “Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales” , Trabajo de Diploma para la obtención del título de Ingeniera Civil, UHO,Cuba,2013.

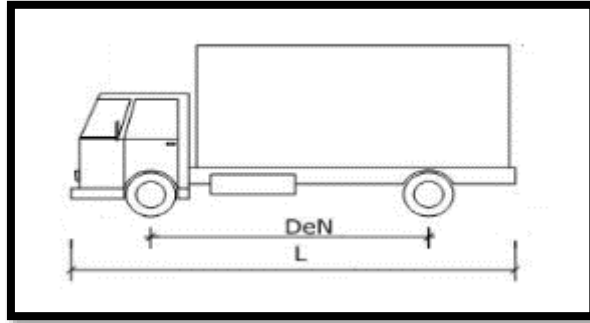


Figura I.16 Vista Longitudinal del Vehículo. Fuente: Almaguer (2011)

DeN: Distancia entre ejes consecutivos.

L: Longitud total del vehículo.

Tabla I.5 Distancias entre ejes. Fuente: Ramos (2012)

	Resultados obtenidos por Almaguer					
Silueta	DeN1	DeN2	DeN3	DeN4	DeN5	Longitud
S2	4.47	-	-	-	-	7.83
S3	4.36	1.33	-	-	-	8.84
S4	5.17		-	-	-	9.33
S5	3.44	5.04	-	-	-	10.98
S6	3.66	5.8	1.19	-	-	13.21
S7	3.14	1.35	6.05	1.23	-	14.88
S10	4.98	1.45	7.17	1.19	1.15	18.47
S13	4.64	4.71	3.96			15.47
S14	4.56	1.56	5.03	3.85		17.37

Tabla I.6 Distancias entre ejes. Fuente: Rossigali (2006)

	Resultados obtenidos por Rossigali				
Siluetas	DeN1	DeN2	DeN3	DeN4	DeN5
S2	4.47	-	-	-	-
S3	4.36	1.33	-	-	-
S4	5.17	-	-	-	-

S6	3.66	5.8	1.19	-	-
----	------	-----	------	---	---

Tabla I.7 Distancias entre ejes. Fuente: Sardiñas (2009)

	Resultados obtenidos por Sardiñas				
Siluetas	DeN1	DeN2	DeN3	DeN4	DeN5
S2	4.0	-	-	-	-
S3	4.9	1.3	-	-	-
S4	5.9	-	-	-	-
S6	3.9	7.3	1.3	-	-

Existen otras variables que intervienen en el progreso del modelo como la velocidad de circulación a 80 m/s, la geometría del puente que se explicará más adelante en la selección del prototipo analizado y la longitud cargada que es la distancia entre los ceros de la línea de influencia que se tendrá en cuenta a la hora de obtener las solicitaciones.

I.3 Modelos de cargas verticales

“Son diversos los modelos para la consideración del efecto de la carga móvil. En general ellos se basan en la teoría de los procesos estocásticos y en la simulación de las configuraciones del tráfico real.”⁽²¹⁾ A continuación se presentarán algunos de los métodos que describen su procedimiento.

I.3.1 Modelo de Nowak e Lind (1979)²²

Este método usa datos de una inspección del tráfico en Ontario, 1975. Para la previsión del esfuerzo máximo en los puentes en 50 años de vida útil, los momentos

²¹ Maldonado Ferreira, Luciano “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 37

²² Maldonado Ferreira, Luciano “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de

flectores a partir de los datos del tráfico real son extrapolados a partir de los datos del tráfico real, pues el período de medición es inferior al de la vida útil considerada. Se asume que la cola superior de la distribución sea exponencial:

$$F_{L50}(x) = 1 - e^{-x}$$

En la escala exponencial, esta extrapolación corresponde a una línea recta. Ajustada a la cola superior de la distribución de los momentos flectores (para varios espacios, simplemente apoyado o continuo), determinada a partir de los 6 camiones más pesados en la muestra. (NOWAK e ZHOU, 1985)

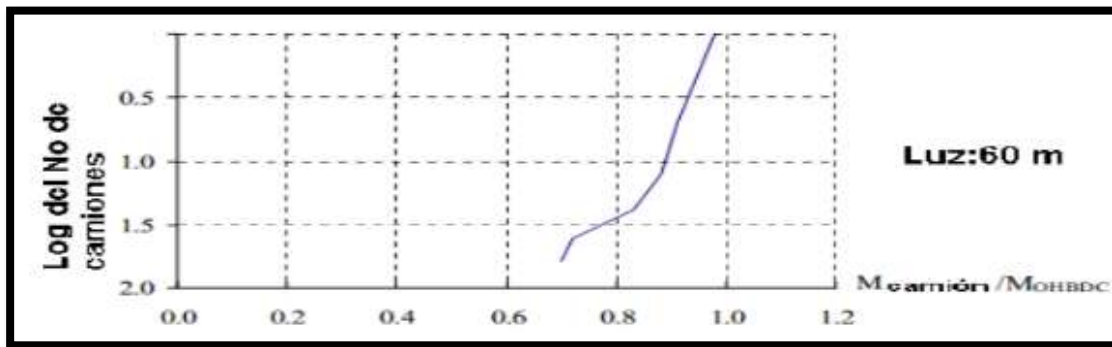


Figura I.17 Cola superior de distribución de los momentos flectores. Fuente: Maldonado (2006)

La escala horizontal corresponde a la relación entre el momento flector del camión de la muestra y el momento flector obtenido de acuerdo con la norma canadiense (OHBDC) de la época. La escala vertical es el logaritmo del número de camiones que exceden o igualan la relación de momentos flectores. Por ejemplo la relación mayor corresponde al cero en la escala vertical, pues sólo 1 camión en la muestra causa momento igual al superior y $\ln(1) = 0$. La segunda mayor relación corresponde al $\ln(2) = 0.693$, porque 2 camiones de la muestra igualan o superan el segundo momento flector mayor y así consecutivamente.

Considerando que la población de camiones en 50 años será 600 veces más grande que la muestra, el promedio del momento flector máximo corresponde a $\ln(600) =$

6.397 en la escala vertical. La extrapolación puede verse en la ilustración I.18, el análisis también consideró que pueden desprejarse 1 o los 2 camiones más pesados de la muestra.

(NOWAK e ZHOU, 1985)

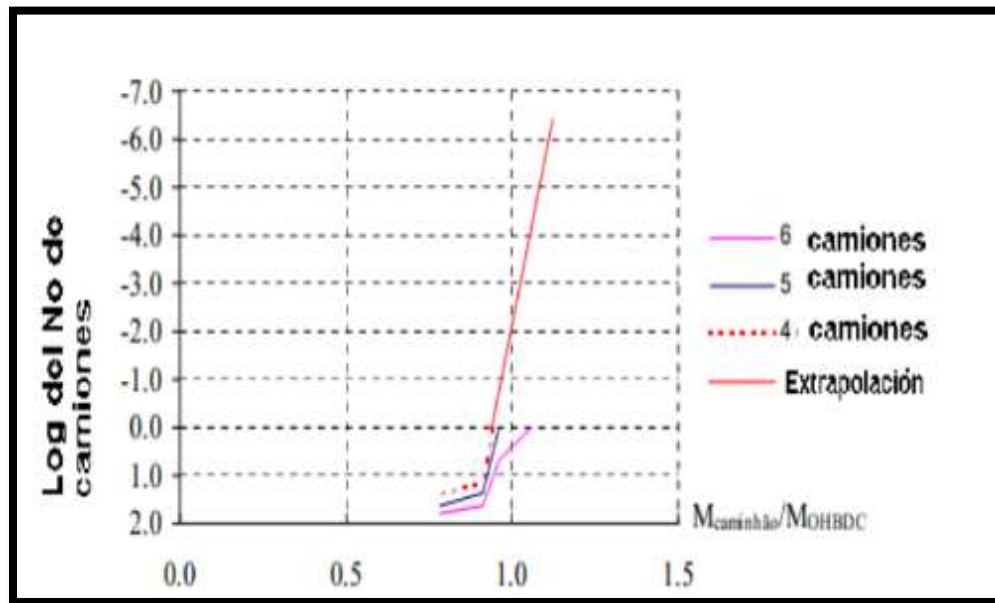


Figura I.18 Extrapolación para una vida útil de 50 años. Fuente: Nowak e Zhou (2006)

En general, el procedimiento consiste en extrapolar el número de camiones, interceptar la curva con dicha extrapolación y obtener en el eje x el valor de momento.

I.3.2 Modelo de Moses e Ghosn (1985)²³

Ghosn y Moses resalta la teoría de los procesos estocásticos como una herramienta útil para el análisis de estructuras sometidas a cargas aleatorias. La técnica utilizada se basa en el modelo de renovación de Markov, capaz de ser adaptado para considerar tanto el modelo de llegada de camiones al puente (medido

²³ Maldonado Ferreira, Luciano "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto", Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 39-40

o idealizado) como las características de los camiones (los pesos y espaciamiento de los ejes). La distribución de probabilidad del efecto máximo de la carga móvil es determinada para el tiempo de vida útil de la estructura.

Ellos consideran sólo dos tipos de camiones en los eventos de cargas. Dependiendo del tipo, cada camión es asociado a un peso y a la probabilidad obtenida en los histogramas de peso bruto. Dado las posiciones de los dos camiones y el peso de todos los camiones en el evento, el efecto máximo es calculado a través de la línea de influencia del puente y asociado a una probabilidad (la probabilidad de la hilera ocupada por el camión principal, la probabilidad condicional de las hileras ocupadas para los camiones siguientes, tiempos de probabilidad de la posición longitudinal del vehículo en el puente, la probabilidad de los pesos brutos). Este procedimiento asume la independencia entre las posiciones relativas de los dos camiones y los pesos brutos de los diferentes camiones en el evento.

El cálculo del esfuerzo en la sección más crítica, se ejecuta para todas las combinaciones de camiones en el puente y para todos los pesos de los camiones. Siguiendo esa metodología, se obtiene un histograma que proporciona el efecto del momento flector asociado a su probabilidad. La distribución de probabilidad del máximo efecto para la vida útil del proyecto de la estructura, depende del número de eventos de cargas en un día y de la vida útil de la estructura.

1.3.3 Modelo de Nowak (1999) ²⁴

En la calibración de coeficientes parciales para AASHTO (1994), Nowak (1999) usa los resultados de una inspección del tráfico de camiones logrado en 1975 por el Ministerio del Transporte de Ontario. En ese estudio, son observados aproximadamente 10.000 camiones (sólo camiones que parecían poseer elevado peso bruto de la totalidad, que eran medidos e incluido en la base de datos),

²⁴ Maldonado Ferreira, Luciano “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 43.

representando 2 semanas de tráfico. Vale la pena destacar que por ese tiempo la población de camiones de Ontario era representativa de los camiones que circulaban en los Estados Unidos.

De acuerdo con Nowak (1999), son varias las incertidumbres en el análisis debido a las limitaciones de los datos obtenidos del tráfico, entre ellas: la muestra de camiones estudiada es pequeña en comparación con el número real de camiones durante la vida útil del puente (75 años), algunos camiones sobrecargados intencionalmente evitan las estaciones de pesaje, y las futuras inclinaciones en distribuciones de pesos y ejes son desconocidas. En el trabajo, se asume que la población de camiones permanecerá inalterada y que las legislaciones no cambiarán en el futuro.

Para cada camión de la muestra eran calculados los momentos flectores y fuerzas cortantes. Considerando luces simplemente apoyadas y dos luces idénticas continuas. Las funciones de distribución acumuladas eran ploteadas en un papel de probabilidad normal. Los máximos momentos flectores y las fuerzas cortantes para varios períodos (superior a 2 semanas) eran determinados por extrapolación. Por ejemplo, en 75 años el número de camiones sería aproximadamente $20 \text{ N} = \text{millón}$, cuyos nivel de probabilidad es $1/\text{N}$, o sea 5×10^{-8} .

Ese valor corresponde a $z = 5.33$ ($Z = -\Phi(1/\text{N})$) en la escala vertical. En la figura I. 19 se muestra la extrapolación para el momento flector negativo en una luz de 9m.

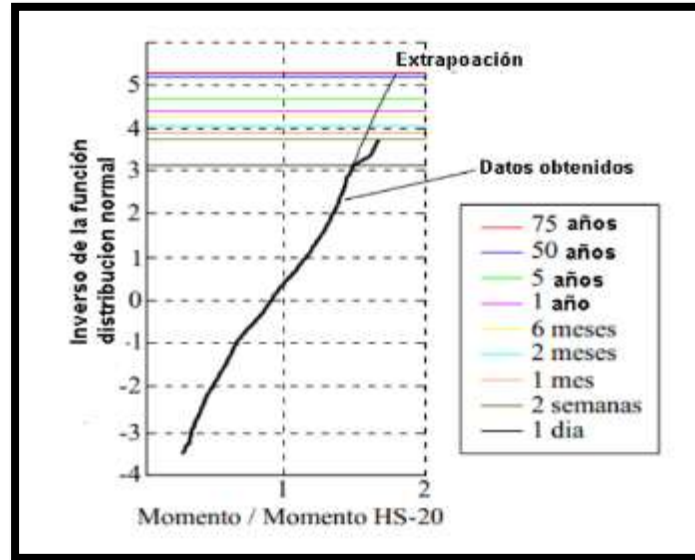


Figura I.19 Extrapolación para el momento flector negativo en una luz 9m. Fuente: Maldonado (2006)

A partir de gráficos como el anterior se confeccionan tablas; que como proporcionan la relación entre el esfuerzo causadas por el camión observado y el modelo HS-20 (vehículo de la norma canadiense, OHBDC) para varios espacios y períodos. Estas tablas muestran el promedio de momentos flectores máximos para luces con un solo camión aislado, la Figura I.20 ejemplifica una de estas tabulaciones. Pueden obtenerse además gráficos similares para la fuerza cortante y momento flectores negativos en las luces continuas. A partir de esos datos el coeficiente de variación también es determinado.

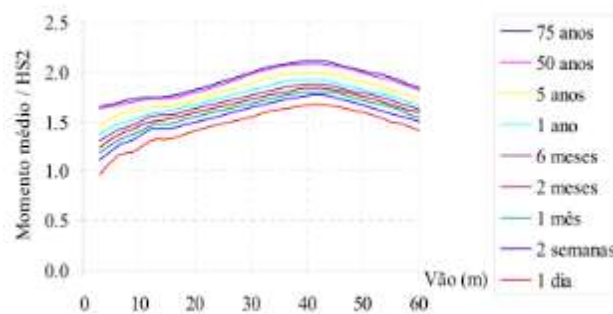


Figura I.20 Promedio de momentos flectores máximos para luces con un solo camión aislado. Fuente: Maldonado (2006)

I.3.4 Modelo de Crespo-Minguillón y Casas (1997) ²⁵

De acuerdo con Crespo-Minguillón y Casas (1997), los modelos de tráfico existente no son completamente generales pues son orientados para la previsión de los efectos máximos en un período de tiempo definido o para la definición de los efectos de fatiga. Las suposiciones y las simplificaciones adoptadas (debido a las herramientas computacionales o a los datos del tráfico necesario) en modelos no se tornan suficientemente confiable. Por otro lado, los modelos de carga disponibles son dirigidos o para la definición de las acciones en nuevos puentes o para la evaluación de puentes existentes.

Así, Crespo-Minguillón y Casas (1997) concluyen que un modelo completo, válido para todo efecto de carga (carga máxima en un período de referencia, fatiga, carga frecuente para la verificación de los estados límites de utilización), para cualquier situación (proyecto de un nuevo puente o para la evaluación de una estructura existente), considerando las correlaciones más importantes presentes en el tráfico real, no está disponible actualmente.

El efecto del tráfico sobre el puente es simulado cada 0,20 segundos, durante una semana. El cálculo de los momentos flectores es realizado a través de la superficie de influencia de la estructura. Los autores no proporcionan ningún tipo de comparación con otros métodos. Los detalles sobre las hipótesis asumidas y los procedimientos matemáticos y estadísticos, incluso la extrapolación de los resultados para la vida útil de la estructura, no se especifican en este estudio.

I.3.5 Modelo de Hwang y Koh (2000) ²⁶

Hwang y Koh (2000) utilizan como base para el desarrollo de su modelo datos del peso en movimiento (weight in motion WIM) en 3 localidades, cerca de 100 mil en

²⁵ Maldonado Ferreira, Luciano “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 51.

²⁶ Maldonado Ferreira, Luciano “Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto”, Tese apresentada à Escola de Engenharia de

el total. La información sobre la presencia múltiple de vehículos en los puentes se obtienen a través de grabaciones de videos que fueron consideradas en el análisis, de los tipos de camiones más pesados y los otros eran despreciados. De esa manera fueron considerados 7 tipos de camiones.

Para cada localidad y tipo de camión, el 10% de los mayores pesos brutos eran planteados en el papel de probabilidad normal. Utilizando una regresión lineal y considerando la relación entre el número de camiones observados y previsto para la vida útil de la estructura (75 años), los máximos pesos brutos fueron extrapolados. Este procedimiento es similar al que plantea por Nowak (1999) descrito anteriormente.

Los mayores pesos brutos provenientes de la extrapolación para cada tipo de camión fueron usados para el cálculo de momentos flectores máximos en las estructuras simplemente apoyadas. Los resultados demuestran que un solo camión produce el esfuerzo máximo para los espacios pequeños y 2 camiones con la correlación total de peso gobiernan en el caso de las mayores luces.

Los autores sugieren una combinación de camión y carga distribuida para la obtención de los esfuerzos en los proyectos o normas. Además resaltan que la carga distribuida debe tener la magnitud disminuida con el aumento de las luces, de modo que los momentos flectores calculados no sobrestimen el efecto del tráfico real. Ellos recomiendan que los datos del tráfico sean obtenidos en diferentes localidades, debido a su variabilidad.

I.4 Modelos de carga vertical móvil desarrollados en Cuba

I.4.1 Peculiaridades del parque vehicular cubano

En la NC 334:2004 Carreteras – Pavimentos Flexibles – Métodos de Cálculo, se muestran las 11 siluetas pertenecientes al parque vehicular cubano. Estudios encaminados a la caracterización geométrica y estimación del estado de carga del parque vehicular demuestran que: las siluetas de la NC 334:2004 no abarcan la totalidad de vehículos y configuraciones de estos existentes en el país. En los

São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil 2006. pág. 53

estudios mencionados se consideran 14 siluetas al igual que en la presente investigación (Anexo – 1).

La letra S denota las siluetas; los vehículos ligeros se encuentran agrupados en las siluetas S00 y S01 y los pesados son representados por las siluetas que se encuentran entre S02 y S14. (Almaguer González, 2011)















<i>Nº</i>	Ejes	Siluetas
S0	Ligeros	
S1	2S-4R	
S2	2S-6R	
S3	1S-1T	
S4	2S-6R	
S5	3S	
S6	2S-1T	
S7	1S-2T	
S8	2T	
S9	2S-Tr	
S10	1S-1T-1Tr	
S13	4S	
S14	Al menos 1T	 

Figura I.21 Siluetas del parque vehicular. Fuente: Almaguer González (2011)

El peso de los vehículos pesados registrados oscila en estado vacío entre 7,82 t y 17,5 t y en su estado lleno desde 14,19 t a 50,8 t. La distancia entre ejes varía entre 3,44 m y 7,34 m. Los anchos de vehículos van desde 2,23 m hasta 2,37 m, el largo de los mismos varía entre 7 m y 18,47 m y por otro lado el alto de estos está entre 2,88 m y 3,88 m. Estos vehículos pueden tener desde 2 hasta 4 ejes. (Ramírez Rodríguez, 2015)

I.4.2 Modelos de carga vertical móvil desarrollados en puentes de tipología cubana

Se han desarrollado estudios con el fin de desarrollar modelos de carga vertical móvil en nuestro país, precisamente en la provincia de Holguín se han desarrollado modelos sobre los puentes ubicados sobre los ríos Mayarí y Sagua.

En un estudio realizado por: Dania Infante Suárez titulado “Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales” presentado como tesis de diploma en opción al título de ingeniero civil en el año 2013 demostró que el modelo de carga MS-32 genera solicitaciones inferiores a las ocurridas por el paso de los vehículos que realmente circulan por las carreteras cubanas.

Se obtuvo un modelo, que responde a cargas concentradas semejantes a las siluetas analizadas en el estudio y al vehículo de diseño MS-32. El estudio se realizó analizando vehículo a vehículo sobre el puente.

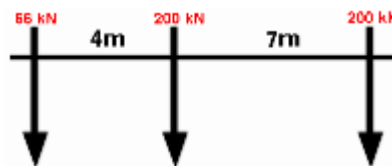


Figura I.22 Modelo 1. Fuente: Infante Suárez (2013)

El modelo obtenido en el estudio referido es un 30% más pesado que el MS-32 de la NC 733: 2009, y 137 kN menor que la silueta S-10, del parque vehicular cubano, en su estado lleno. En cuanto a los efectos, excede a los producidos por el MS-32 y como el 44.5% de los vehículos seleccionados para el estudio, aunque solo en 10 kNm con respecto a la S-10 lleno, que es el vehículo que produce un mayor efecto. Otro estudio fue el realizado por Ricardo Ramírez Rodríguez titulado “Obtención de un modelo de cargas verticales móviles para puentes de tipología cubana, en la carretera Holguín-Moa” presentado como trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil en el año 2015. En este caso el análisis se realizó con secuencias de vehículos arrojando los siguientes resultados.

La carga distribuida para el cálculo del momento del modelo obtenido supera en un 53.3 % a la carga distribuida del MS – 32, la carga concentrada del nuevo modelo

es de 125.6 kN, y supera a la del vehículo normado en 43.9 kN, que es de 81.7 kN. Este excedente representa un 53.7 % de la carga concentrada del MS– 32.

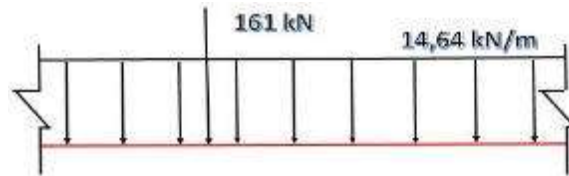


Figura I.23 Modelo de carga vertical para el cálculo de momento Fuente: Ramírez Rodríguez; (2015)

Para el cálculo del cortante la carga concentrada excede en 43 kN a la carga concentrada de cortante del vehículo MS-32, la del nuevo modelo obtenido es de 161 kN. El valor en exceso representa un 24.8 % de la carga concentrada del vehículo normado.



Figura I.24 Modelo de carga vertical para el cálculo de cortante. Fuente: Ramírez Rodríguez; (2015).

Conclusiones del capítulo

La principal conclusión del presente capítulo es que un modelo de carga vertical móvil para puentes de carretera está condicionado por las características del tráfico. Estas son variables en cada zona o país, siendo necesario para un diseño racional de estas estructuras un modelo que represente las peculiaridades del tráfico de la zona en cuestión.

También se debe señalar que los estudios realizados en el prototipo de puente seleccionado demuestran que el vehículo MS-32 genera solicitaciones menores a las causadas por los modelos obtenidos ya sea por siluetas separadas como en el estudio de Dania Infante Suárez o por secuencias de vehículos como muestra Ricardo Ramírez Rodríguez en su investigación.

CAPÍTULO II. OBTENCIÓN DE UN MODELO DE CARGA VERTICAL MÓVIL, CORRESPONDIENTE A UNA CARGA DE CARRIL.

Introducción al capítulo

En este capítulo se presenta y desarrolla el procedimiento para la obtención de un modelo de carga vertical móvil. El modelo obtenido es comparado con el normado y se establecen las disposiciones pertinentes para su utilización.

II.1 Procedimiento para la obtención del modelo.

En el capítulo anterior se pudo constatar que los principales y más prestigiosos estudiosos del tema siguen un procedimiento similar para la obtención de modelos de carga vertical. Los estudios anteriormente analizados se diferencian principalmente en la zona de recolección de los datos de tráfico, demostrándose una vez más el carácter zonal de estos modelos.

En esta investigación se asume una manera de obtener el modelo bastante similar a las descritas en el capítulo I, sin embargo este estudio es un tanto conservador en cuanto a la extrapolación de los pesos y al mismo tiempo renovador en cuanto a los efectos producidos por el tráfico real de vehículos pesados, que influye directamente en la vida útil de la estructura. Serán analizadas las solicitaciones de momento, cortante y deformación. A continuación se muestran las etapas del procedimiento para la obtención del modelo:

- Selección de los sistemas estructurales representativos.

Es necesario tener en cuenta las diferentes tipologías existentes en nuestro país y seleccionar un prototipo de puente representativo de estas características. Para la selección del puente a analizarse son tenidas en cuenta consideraciones presentes en normas como el Eurocódigo, la AASHTO (Estados Unidos), STC (México) y criterios de especialistas en el tema como es Maldonado Ferreira. Es fundamental seleccionar las características de la estructura que influyen en el análisis específico que se desea realizar.

- Construcción del modelo numérico del prototipo de puente seleccionado de la carretera Holguín – Moa.

Luego de seleccionado el prototipo de puente se desarrolla su modelo numérico en el software profesional CSiBridge.

- Tratamiento de los datos del tráfico real.

A partir de los datos de tráfico recolectados se seleccionan las siluetas que conformarán la población del estudio, obviándose los vehículos ligeros y los que tengan peso un menor al 75% del peso del vehículo de diseño MS-32. Al software SimulStop se le introducen las características de las siluetas seleccionadas y otros datos como la distancia entre vehículos y la velocidad de estos. El programa toma una muestra de manera aleatoria los vehículos que conformarán la secuencia.

- Modelación de las situaciones del tráfico simuladas, sobre el modelo numérico del prototipo de puente seleccionado.

Al modelo numérico del puente se le añaden las secuencias de vehículos reales y se procesa esta información para obtener las solicitudes originadas por los vehículos. El proceso anteriormente descrito se realiza nuevamente para el vehículo MS-32. Las solicitudes analizadas en esta investigación son: momento, cortante y deformación.

- Análisis estadístico y extrapolación de las solicitudes obtenidas.

Las solicitudes obtenidas son procede a organizar las mismas por clases en rangos que son definidos por el software de procesamiento estadístico Stadt Graphics el cual realiza un ajuste de distribución y realiza las pruebas de ajustes correspondientes. Luego se calcula la inversa de dicha distribución en el software Matcad.

- Extrapolación de las solicitudes.

Con programa Microsoft Excel se confecciona un gráfico que represente el cociente de los valores medios de los rangos y las solicitudes generadas por el vehículo MS-32 contra la inversa de la distribución de la respectiva solicitud. Luego de estimar la cantidad de vehículos que habrán para el período de vida útil que se desean extrapolar y graficar la inversa de esta

cantidad en el gráfico anterior se intersectan estos dos gráficos para obtener el valor con el que se determina el valor de la extrapolación por solicitación.

- Obtención del modelo de cargas.

II.2 Selección de los sistemas estructurales representativos

Para su estudio, Maldonado (2006) se acogió a las siguientes directrices: primeramente prestar atención a los tipos estructurales más comunes y en segundo lugar evaluar la posibilidad de desarrollar el modelo tomado prototipos de puentes reales y ficticios. Por otro lado plantea los siguientes aspectos: los puentes continuos con vanos iguales sirven de referencia, a pesar de que en la práctica los vanos serán, por lo general, desiguales. La mayoría de las veces, las dimensiones de las secciones transversales fueron ajustadas a partir de medias de las dimensiones reales. Para facilitar la comparación de los casos analizados, se buscó estandarizar los valores de las dimensiones, pues estas no siempre salieron directamente del levantamiento. Además, las estructuras analizadas fueron consideradas rectas y con apoyos nivelados.

Parte de los datos de tráfico que se tienen en cuenta en esta investigación fueron recogidos en la carretera Holguín – Moa; en la provincia de Holguín esta carretera presenta los puentes de mayor longitud. En la vía existen 2 tipos de sistemas estructurales representativos, está la tipología cubano – soviética y la tipología cubana, siendo esta última la más empleada; de los diecinueve puentes existentes, dieciséis corresponden a estos tipos estructurales.

Teniendo en cuenta los aspectos tratados anteriormente y que se busca un prototipo de puente representativo de las condiciones locales, en el que el tráfico vehicular pueda causar los mayores efectos en los elementos componentes; el prototipo seleccionado debe ser de tipología cubana.

II.2.1 Descripción de la tipología cubana para puentes de carretera. Proyecto del MICONs.

La tipología cubana para puentes de carretera, o MICONs como también se le conoce, fue desarrollada por un grupo de ingenieros cubanos en la segunda década del siglo XX. Esta presenta luces de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 25 metros

respectivamente. Está diseñado para una carga accidental móvil H – 20 S – 16, y la resistencia del hormigón debe ser de $f'_h = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Para su ejecución presenta 3 módulos distintos de proyectos de carreteras: tipo A, tipo B y tipo C. La primera variante posee paseos de 3.30 m y un ancho de calzada de 7.0 m, además las vigas de tableros se encuentran espaciadas a 1.55 m. La segunda presenta paseos de 2.80 m, una calzada de 6.50 m y las vigas están espaciadas a 1.55 m. Por último el modelo tipo C presenta paseos de 1.8 m, un ancho de calzada de 6.0 m y sus vigas se encuentran espaciadas a 1.4 m.

El tablero del sistema es fundido in – situ, y es de 15 cm de espesor. Las vigas que presentan responden a las luces del sistema, solo varía el armado y el peralte de la misma según sea la luz a cubrir, pues su ancho no varía siendo 0.3 m. Los pretilos son prefabricados. Los pilotes presentan una sección de normalmente 0.4 m x 0.4 m.

La tipología constructiva también puede llevar vigas pretensadas de secciones I y rectangulares, del sistema Freyssinet, Roebling y Stressteel siendo estos sistemas de refuerzos con cables de Alto Límite Elástico (A.L.E).

II.2.2 Selección del prototipo de puente

Según la investigación realizada por días Díaz (2010) en la carretera Holguín-Moa, existe una correlación logarítmica entre la luz máxima de cada puente y la longitud de los mismos, esto permite considerar sólo una de esas variables para caracterizar los puentes de esta carretera. En la correlación que existe entre el gálibo vertical, como referencia de la altura de pilas y estribos, y la longitud total de los puentes sucede algo muy parecido a lo que ocurre entre la longitud total de los puentes y sus luces parciales máximas.

El puente del enlace vial mencionado que posee las luces más largas y por tanto en el que mayores solicitaciones se originan es el ubicado sobre el río Mayarí. Esta estructura presenta grandes deformaciones debido a la sobrecarga de pavimento a la que ha sido sometida y se encuentra en proyecto su reparación. Debido a los problemas estructurales que presenta se hace necesario de realizar un estudio de los efectos del tránsito; pues desde 1986, la comisión de topografía del municipio

realizó un levantamiento y dentro de las recomendaciones se encontró: limitar el paso a todo tipo de vehículos [7]. En el año 2015 los resultados de la comisión de estudio fueron: limitar el peso de los vehículos a 20 toneladas [8]. Aunque según lo planteado por Maldonado (2006), es preferible que los elementos analizados no presenten patologías, se cree más adecuado tomar como prototipo, el Puente sobre el río Mayarí pues debido a las longitudes de sus vanos se generan las mayores solicitaciones y la mencionada necesidad de estudiar los efectos del tráfico sobre la estructura.

II.2.3 Descripción del prototipo de puente seleccionado

El puente Mayarí se encuentra ubicado en la carretera Holguín – Moa, más específicamente en el sub tramo Mayarí – Levisa, kilómetro 84.5, su fecha de construcción se estima hacia el año 1952. Está compuesto por un tablero de vigas prefabricadas y losa fundida in situ, con sección transversal de 11,84 m compuesta por diez vigas espaciadas a 1.2 m y un espesor de losa de 0.15 m. Cuenta con 6 luces; cuatro de 30 m y las dos extremas son de 25 m respectivamente, el gálibo del puente es de 12.9 m. Presenta además una calzada de 6.40 m y la acera es de hormigón armado, de 2.42 m cada una. Los estribos y aletones son pórticos abiertos de 3 columnas cada uno y las pilas están formando pórticos abiertos de 2 y 3 columnas. La cimentación es sobre pilotes hincados y se considera que está ubicado sobre un terreno arcilloso.

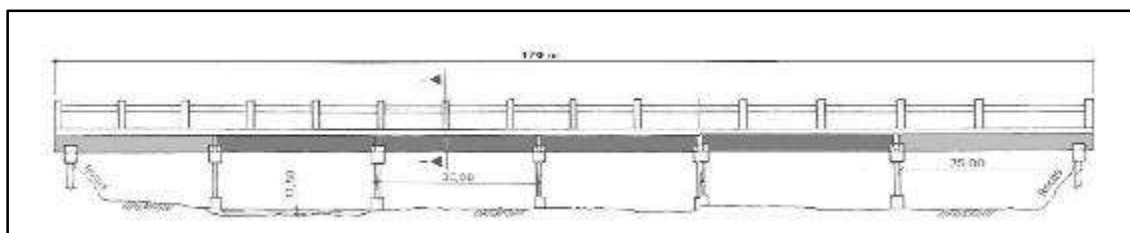


Figura II.1 Sección longitudinal del puente sobre el Río Mayarí. Fuente: Ficha técnica del Puente sobre el Río Mayarí. Inventario Nacional de puentes: Informe de inspección, 1986, Vialidad.

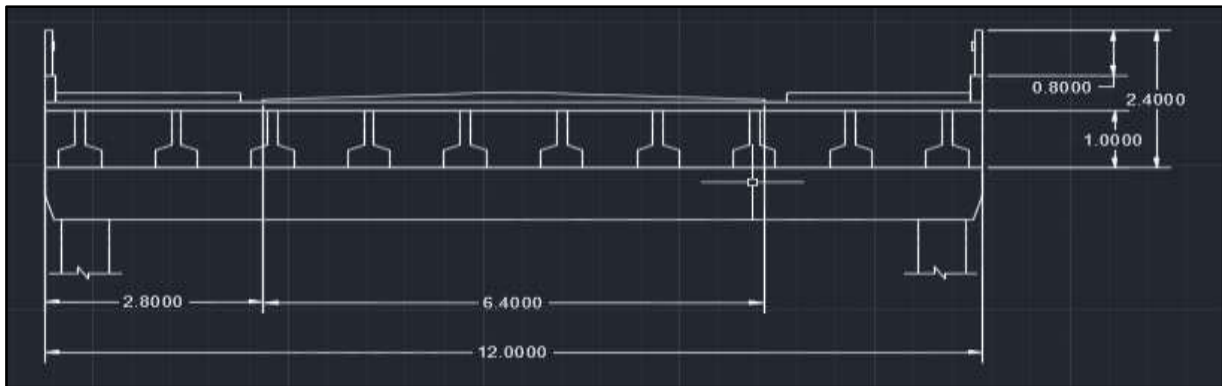


Figura II.2 Sección transversal del puente sobre el Río Mayarí. Fuente: Ficha técnica del Puente sobre el Río Mayarí. Inventario Nacional de puentes: Informe de inspección, 1986, Vialidad.

II.3 Construcción del modelo numérico del prototipo.

El puente es modelado numéricamente utilizando el software profesional CSiBridge v15 de modelación y diseño de estructuras. A continuación se muestra detalladamente el proceso de modelado.

Primeramente se ejecuta el programa.



Figura II.3 Interfaz del software CSiBridge v15. Fuente: software CSiBridge v15

Se accede al botón Bridge Wizard (asistente de puentes).

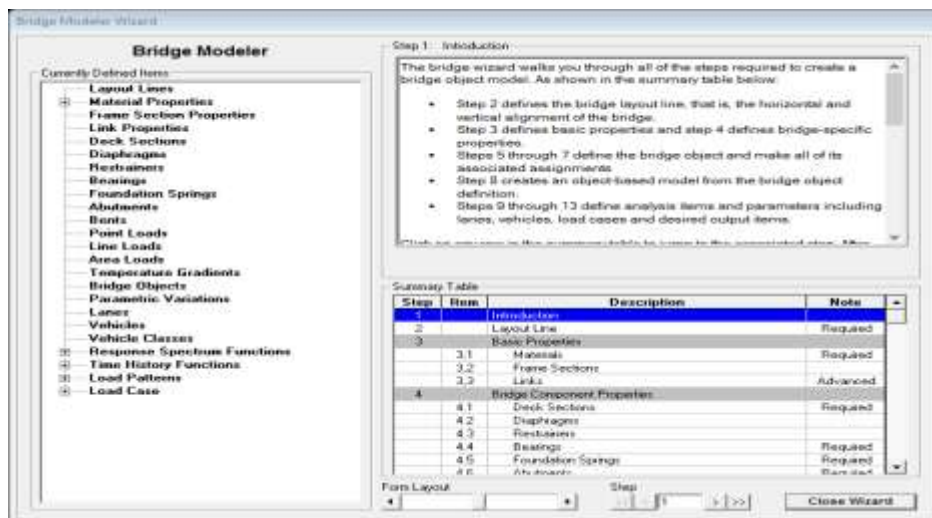


Figura II.4 Botón Bridge Wizard v15. Fuente: software CSiBridge v15

Para introducir las características geométricas del puente y otras especificaciones la ventana Bridge Modeler Wizard cuenta con los siguientes comandos:

- Layout lines (Definición de la alineación):

Layout lines / Define - Show Layout Line / Add new line, se accede a la ventana Bridge Layout Line Data se define la longitud total del puente (170 m). (Ver anexo - 2).

Luego de definida la alineación se acepta (ok) y el objeto es creado en la ventana Define Bridge Layout Line.

- Material Properties (Propiedades del material)

Material Properties / Define - Show Material Properties / Add New Material, luego es mostrada la ventana Material Properties Data. (Ver anexo - 3).

Se especifica el material del puente, siendo este un hormigón 24 MPa de resistencia característica a la compresión; 2,19 de módulo de elasticidad (E); 0.17 de módulo de Poisson y 25 kN de peso por unidad de volumen.

Luego de especificar el material en Material Properties Data se acepta, este es definido como Hgn.21 MPa como fue nombrado, por último en Define Materials se acepta.

- Frame Sections Properties (Propiedades de las secciones transversales)

Frame Sections Properties / Define - Show Frame Sections / Add New Properties; luego se muestra la ventana Add Frame Sections Properties, donde se selecciona el material del cual estará compuesto los elementos a definir. (Ver anexo – 4).

En el puente seleccionado todas los elementos son de concreto, por lo que se selecciona la ventana Concrete y la totalidad de las secciones a definir en esta ventana son rectangulares por lo que se clic en la figura rectangular.

En Rectangular Section se especifican las secciones transversales de los cabezales y de las columnas:

Cabezales: 0.9 x 0.4 m, y 11.8 m de longitud. (Ver anexo - 5).

Columnas: 0.6 x 0.6 m. (Ver anexo - 6).

Dentro de la sección columnas se encuentran incluidos los estribos y columnas, presentando 6m y 11.8 m de altura respectivamente.

Luego de haber definido todas las secciones transversales se confirma cada una y estas serán mostradas en la ventana Frame Properties, se procede a confirmar nuevamente.

- Link Properties (Propiedades de los aparatos de apoyo)

Link Properties / Define - Show Link Properties / Add New Properties / Link – Support Properties Data; en esta ventana se definen las condiciones de apoyo del modelo numérico del puente. (Ver anexo 7).

- Deck Section (Sección transversal de la súper estructura)

Deck Section / Define – Show Deck Section / Add New Section / Select Bridge Deck Section Type. (Ver anexo 8).

En esta ventana Select Bridge Deck Section Type se clic en la opción Tee Beam, luego se muestra la sección transversal de forma más detallada y se pueden definir todas sus características.

Los datos a completar son los siguientes:

Tablero: 0.15 m de espesor

Vigas: 0.54 x 1 m. Y un total de 10 vigas.

Una vez definida la súper estructura se confirma, y en la ventana Define Bridge Deck Section, aparecerá creada la sección transversal del puente con el nombre: BSEC1.

- Diaphragms (Diafragmas)

Diaphragms / Define - Show Diaphragms / Add New Diaphragms / Bridge Diaphragms Property. (Ver anexo 9).

En esta ventana se define el ancho de los diafragmas.

Diafragmas: 1 x 0.15 m.

- Abutments (Estribos)

Abutments / Define - Show Abutments / Add New Abutment / Bridge Abutment Data. (Ver anexo 10).

En esta ventana son definidas las condiciones de apoyo de los estribos así como las condiciones de soporte de los mismos.

Luego de introducir los datos y aceptar se puede comprobar en Define Bridge Abutment la creación de los estribos.

- Bents (Pilas)

Bents / Define – Show Bents / Add New Bridge Bents / Bridge Bents Data. (Ver anexo 11). Aquí aparece la ventana Las pilas y los estribos son definidos individualmente en el

Las pilas y estribos son definidos individualmente. Los datos a introducir para cada caso serán: altura, número de elementos en un pórtico (pilas o estribos), condiciones y posición relativa al borde del puente.

Luego de completar el anterior procedimiento para pilas y estribos en ventana Define Bridge Bents, deben mostrarse 2 elementos uno perteneciente a las pilas y otro a estribos.

- Bridge Objects (Ubicación espacial de los elementos del puente)

Bridge Objects / Define – Show Bridge Objects / Add Bridge Objects / Bridge Objects Data. (Ver anexo 12).

Mediante este comando se ubican espacialmente los pórticos y los diafragmas del puente. El puente sobre el Río Mayarí cuenta con 7 pórticos espaciados a 25 y 30 metros indistintamente, de acuerdo a la disposición de las luces, además posee 5 diafragmas por luz, espaciados simétricamente, que son definidos en la ventana

Bridge Objects Data con el comando In - Span Cross Diaphragms / Modify Show. (Ver anexo 13).

Después de creados todos los objetos del puente, se acepta y estos aparecen definidos en la ventana Define Bridge Objects.

- Lanes (Carriles de Circulación)

Lanes / Define – Show Lanes / Add New Lanes Defined From Layout Line / Line Data. (Ver anexo 14).

En esta ventana se especifica el sentido de circulación de los carriles así como su ancho, en este caso 3,2 metros.

Luego en Define Lanes se puede comprobar la creación de los carriles.

Luego de haber especificado todos los parámetros del puente es necesario actualizar el modelo, para que el programa reconozca los cambios realizados. Se debe proceder de la siguiente manera:

En la ventana principal del programa se accede al menú Bridge, botón Update y luego se despliega la ventana Update Bridge Structural Model (ver anexo 15) donde, manteniendo los parámetros establecidos por defecto por el programa se presiona el botón OK.

Es importante destacar que al introducirse un nuevo dato o modificar cualquier elemento es necesario actualizar el modelo, como se explica anteriormente, para que al efectuar cualquier operación posterior se tengan en cuenta los cambios realizados.

Modelo numérico del prototipo de puente obtenido:

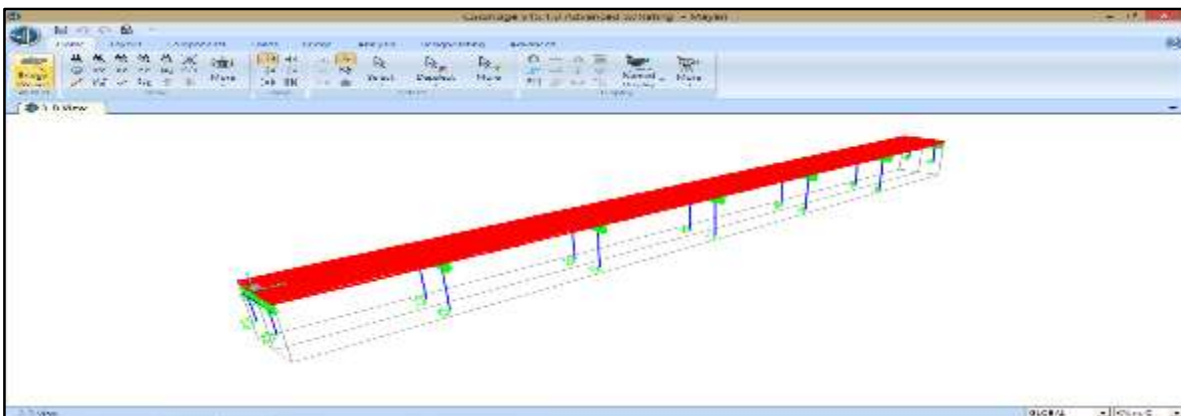


Figura II.5 Vista 3d del modelo obtenido. Fuente: Software profesional CSiBridge.

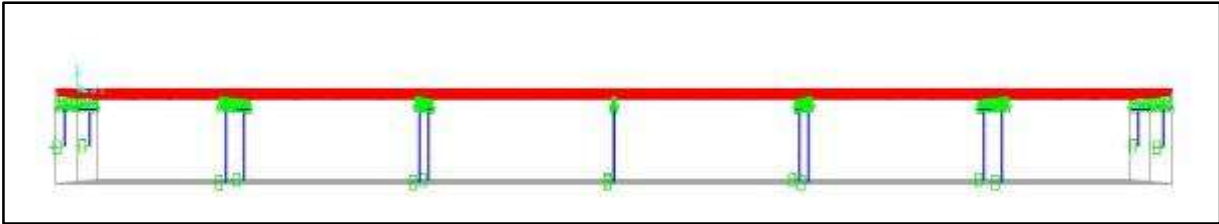


Figura II.6 Vista longitudinal del modelo obtenido. Fuente: Software profesional CSiBridge.

II.4 Simulación de las situaciones del tráfico.

Los datos de tráfico utilizados en la investigación fueron tomados de estudios realizados en los años 2011 y 2012 por Almaguer González, Villalón Caballero y Ramos Cruz. Los vehículos considerados para el estudio son los que cuentan con un peso igual o superior al 75% del peso del vehículo MS-32.

Siluetas - Estado	Conteo	Siluetas - Estado	Conteo	Siluetas - Estado	Conteo
S2-V	32777	S6-LL	3683	S10-V	790
S2-M	24112	S7-M	3349	S5-LL	731
S2-LL	17791	S6-V	3246	S8-V	650
S4-LL	12941	S6-M	2826	S13-LL	649
S4-V	11628	S9-LL	1764	S8-M	581
S4-M	10643	S8-LL	1585	S5-M	556
S3-V	8568	S14-LL	1330	S14-V	524
S3-LL	6882	S10-LL	1313	S13-M	466
S7-LL	6706	S9-M	1032	S14-M	412
S3-M	6242	S10-M	883	S5-V	341
S7-V	4013	S9-V	855	S13-V	341

Figura II. 7 Resultados de los aforos. Fuentes Ramos (2012), Villalón (2011) y Almager (2011).

No.	Siluetas que sobrepasa el 75% del peso del MS - 32	Conteo
1	S3-LL	6882
2	S7-LL	6706

3	S6-LL	3683
4	S7-M	3349
5	S6-M	2826
6	S9-LL	1764
7	S8-LL	1585
8	S14-LL	1330
9	S10-LL	1313
10	S9-M	1032
11	S10-M	883
12	S5-LL	731
13	S13-LL	649
14	S8-M	581
15	S14-M	412
	Σ	33726

Figura II. 8 Siluetas que sobrepasan en un 75% al peso del vehículo MS-32.

Fuente: Elaboración propia (Software Microsoft Excel).

Las situaciones de tráfico fueron simuladas utilizando el software SimulStop.

En la opción inicio de la barra de herramientas se encuentran las siguientes opciones. En el botón Vehículo se precisaron las características fundamentales de cada silueta (ver anexo 16). Las velocidades y distancias se introducen por las opciones con el mismo nombre (ver anexos 17 y 18 respectivamente). La frecuencia de paso de cada vehículo se introduce por la opción Vehículos (ver anexo 19).

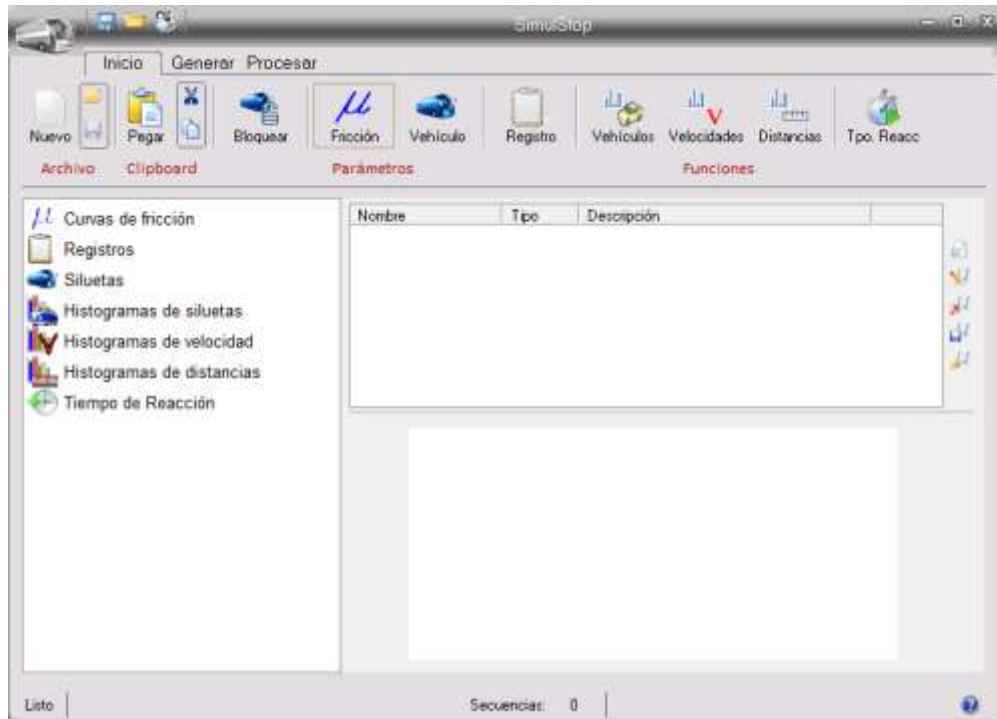


Figura II.9 Interfaz del software SimulStop. Fuente: Software SimulStop

Es importante resaltar que la secuencia de paso de cada silueta, las velocidades y distancias de paso se introducen al programa en forma de frecuencias y estas se calculan con la fórmula:

$$FR = \frac{\text{No. de vehl. de la silueta}}{\text{Tamaño de la muestra}} * 100$$

Figura II.10 Frecuencia relativa.

El programa ilustra en un histograma la ocurrencia de paso de cada silueta.

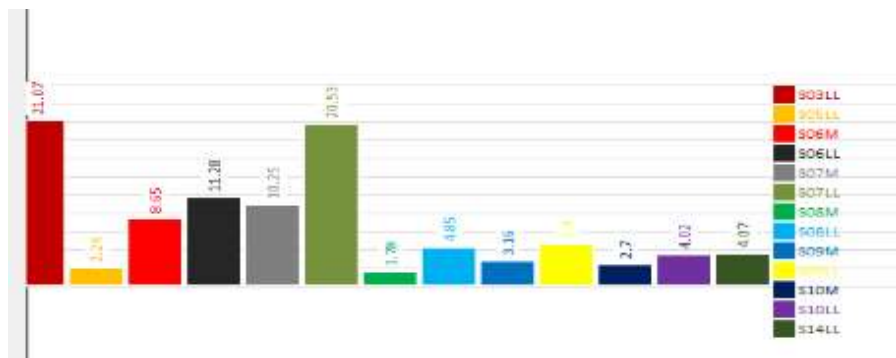


Figura II.11 Histograma de frecuencia relativa (vehículos). Fuente: Software SimulStop.

Al acceder a la opción generar de la barra de herramientas el software procede a tomar una muestra aleatoria de vehículos o siluetas que conformarán la secuencia, también el programa especifica la distancia entre vehículos, su velocidad y el orden de las siluetas en cada secuencia que también es aleatorio. En este caso se toman 100 secuencias con una longitud máxima de 400 metros.

No.	Secuencia	No. V.	Longitud	Veloc.	Coef.
1	514LL (50.2425) -> 505LL (526.602) -> 507LL (2...	8	776.695	65.5...	0.65
2	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	813.8094	88.8...	0.65
3	507M (53.7729) -> 505LL (295.3022) -> 505LL (5...	7	918.0722	79.3...	0.65
4	505LL (252.4021) -> 505LL (54.8954) -> 505LL (5...	8	974.8955	81.5...	0.65
5	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	712.515	66.1...	0.65
6	507LL (25.4022) -> 505LL (204.6448) -> 507LL (5...	8	883.3182	77.0...	0.65
7	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	813.8094	88.8...	0.65
8	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	813.8094	88.8...	0.65
9	505M (180.2071) -> 505M (50.2101) -> 505LL (5...	8	977.219	80.3...	0.65
10	505LL (248.7008) -> 505M (54.9758) -> 507LL (5...	8	885.8073	88.2...	0.65
11	507LL (50.2425) -> 505LL (204.6448) -> 507LL (5...	8	883.3182	77.0...	0.65
12	507LL (140.0754) -> 505LL (137.6262) -> 507M (5...	7	940.0761	63.7...	0.65
13	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	813.8094	88.8...	0.65
14	507LL (136.3807) -> 505LL (204.6448) -> 507M (5...	8	875.3807	63.3...	0.65
15	507M (157.6113) -> 507M (185.2107) -> 505LL (5...	5	680.7662	73.654	0.65
16	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	813.8094	88.8...	0.65
17	505M (180.2071) -> 505M (50.2101) -> 505LL (5...	8	977.219	80.3...	0.65
18	507M (176.1458) -> 507M (130.6419) -> 507M (5...	4	784.6758	69.4...	0.65
19	518LL (578.8094) -> 518LL (578.8094) -> 518LL (5...	3	813.8094	88.8...	0.65
20	507LL (140.0754) -> 505LL (137.6262) -> 507M (5...	7	940.0761	63.7...	0.65

Figura II.12 Secuencias vehiculares. Fuente: Software SimulStop.

Estas secuencias son guardadas como bases de datos para su posterior utilización, se procede clicando en la opción CSiBridge (ver anexo 20).

II.5 Obtención de las solicitudes.

Mediante la opción importar bases de datos se pueden se puede añadir al modelo numérico del puente las secuencias vehiculares, luego se procede a correr el programa con el objetivo de obtener las solicitudes correspondientes en cada uno de los casos.

En la barra de herramientas del software CSiBridge, (figura II.3), se accede al menú Analysis, luego se presiona el botón Run Analysis (ver anexo 21), seguidamente en la ventana Set Load Cases to Run se muestran todos los casos de cargas incluyendo el peso propio de la estructura, aquí se seleccionan los casos de interés para el estudio y se presiona el botón Run Now.

Cuando el programa termine de analizar se pueden apreciar los gráficos de las solicitaciones por viga y de la sección general siguiendo los siguientes pasos: Home / Show Bridge Superstructure Forces – Stresses (ver anexo 22) Bridge Object Responses Display, (ver anexo 23).

Para comparar más fácilmente las solicitaciones generadas por el tráfico real y las del vehículo normativo MS-32 es necesario exportar los resultados obtenidos al software Microsoft Excel, para completar esta acción en la ventana Bridge Object Responses Display se encuentra el botón Export to Excel (ver anexo 24). Luego al acceder al documento Excel resultante de la anterior operación se encuentran tabulados la totalidad los datos de las solicitaciones (anexo 25). Para conocer de manera más rápida los valores máximos y mínimos de cada solicitación se acceden a las funciones Max y Min (anexo 26). Los datos obtenidos están organizados por vigas; para momento, cortante y torsión (ver anexo 25).

El procedimiento anterior, exceptuando el primer paso referente a las secuencias vehiculares, fue utilizado también para conocer los esfuerzos generados por el modelo MS-32, tanto el vehículo formado por tres cargas puntuales como su versión en forma de línea de diseño o carga sustitutiva y también para conocer los esfuerzos causados por las cargas unitarias puntual y distribuida.

Para la carga de carril o sustitutiva MS-32 se obtuvieron las siguientes solicitaciones totales: momento máximo 1609.5966 KN*m, mínimo -105.711 KN*m; cortante máximo 217.981 KN, mínimo -220.715 KN; torsión máxima 471.4045 KN*m, mínima -467.9616 KN*m. Para el vehículo MS-32 formado por cargas puntuales se tienen las siguientes solicitaciones totales: momento máximo 1975.8218 KN*m, mínimo -77.8958 KN*m; cortante máximo 285.485 KN, mínimo -285.485 KN; torsión máxima 514.1286 KN*m, mínima -514.1286 KN*m. El promedio de las solicitaciones totales generadas por las 100 secuencias de vehículos del parque vehicular cubano el siguiente momento máximo 2291.289 KN*m, mínimo -123.386 KN*m; cortante máximo 321.373 KN, mínimo -355.203 KN; torsión máxima 571.862 KN*m, mínima -517.715 KN*m.

Comparación de los efectos de los vehículos reales con los normativos.

Para el momento los efectos generados por el tráfico real exceden en un 42.35% y en 15.96% a los efectos ocasionados por la carga sustitutiva y el vehículo MS-32 representado por cargas puntuales respectivamente. Analizando el cortante se demuestra que el ocasionado por las secuencias es 60.9% y 24.42% que el causado por la carga sustitutiva y el vehículo MS-32 representado por cargas puntuales respectivamente. Para la torsión se tiene que las solicitaciones son mayores en 21.3% y 11.2% que las causadas por la carga de carril y el vehículo MS-32 representado por cargas puntuales respectivamente.

La secuencia número 63 arrojó las mayores de solicitaciones, para momento máximo total 3646.7217 KN*m, mínimo -208.1349KN*m; cortante máximo total 532.498 KN, mínimo -536.044 KN; torsión máxima 865.4355 KN*m, mínima -851.9082 KN*m. Como puede observarse estas solicitaciones representan casi el doble de las solicitaciones generadas por los modelos normados, también es importante mencionar que se alejan mucho de los esfuerzos promedio de las 100 secuencias. Desde el punto de vista estadístico estos valores no son representativos de la población de secuencias anteriormente mencionadas, pero demuestran las grandes solicitaciones que puede generar el tráfico cubano.

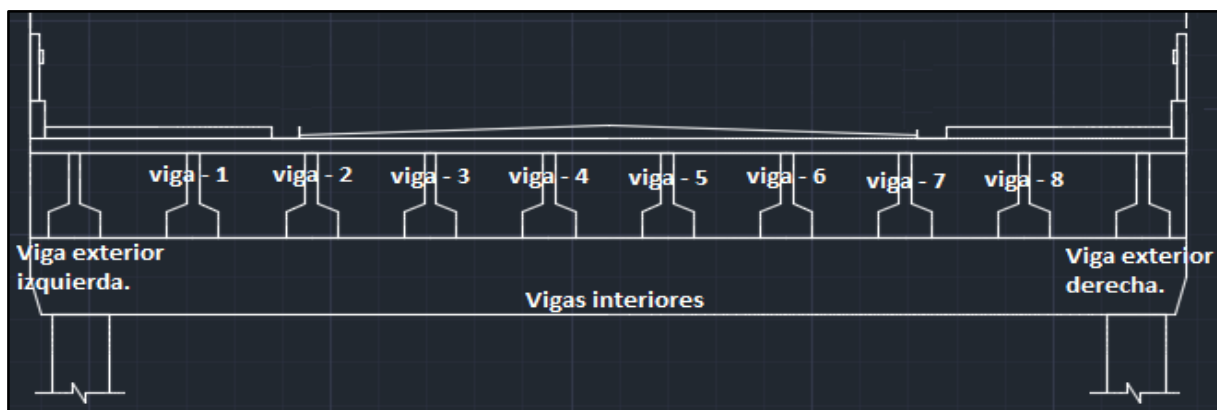


Figura II.13 Convenio (se lee de izquierda a derecha). Fuente: Elaboración propia. (Software Auto Cad).

Analizando las solicitaciones viga a viga se constata que los mayores esfuerzos son producidos en la viga exterior derecha (Fig II.10). Estas solicitaciones se comportan de forma muy parecida a las solicitaciones totales. De esta forma se demuestra la

no correspondencia entre las solicitudes generadas por los vehículos que circulan por las vías cubanas y las ocasionadas por los modelos normados en la NC 733: 2009.

II.6 Tratamiento estadístico de las solicitudes obtenidas.

Para procesar estadísticamente la información obtenida, se utiliza el software profesional de análisis estadístico Statgraphics. Es importante aclarar que para ajustar las solicitudes a una distribución de forma más fidedigna se procedió a calcular el logaritmo base 10 de estas y con dichos resultados realizar las pruebas de bondad de ajuste correspondientes, esta práctica es ampliamente utilizada para analizar datos continuos. Primeramente se accede al menú Analizar / Datos continuos / Ajuste de distribuciones / Ajuste de datos no censurados (anexo 27), y directamente el programa muestra el ajuste de distribuciones y el histograma de frecuencia por clases de vehículos que son definidas por el programa como rangos de valores, así como las pruebas de bondad de ajuste (anexo 28). En esta ventana se selecciona el ajuste de distribución que mejor se adecúe, teniendo en cuenta la no excedencia para un 95 % de probabilidad.

Se sigue este procedimiento y se obtienen siguientes datos:

Para momento la distribución seleccionada fue una Weibull (3-parámetros)

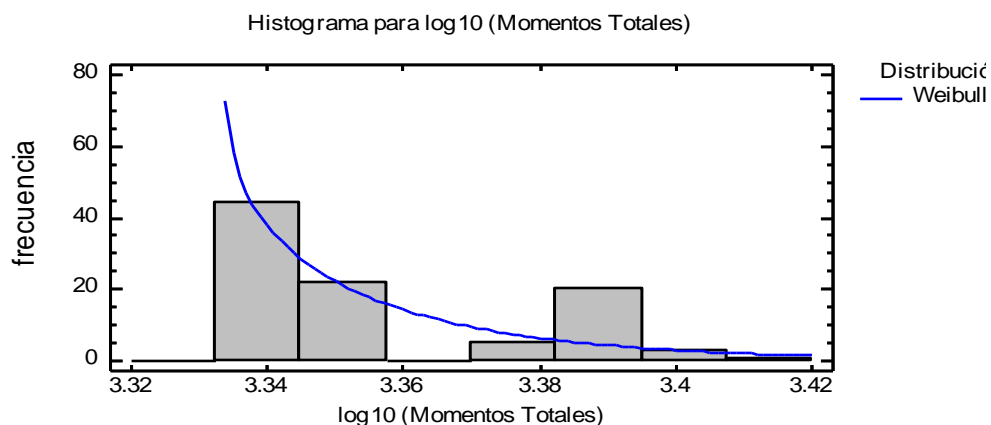


Figura II.14 Histograma para log 10 de los momentos totales. Distribución Weibull.

Fuente Statgraphics

El reporte de ajuste de distribuciones se muestra en el anexo - 29

Luego con el software Mathcad, que es también un software profesional especializado en el cálculo estadístico, se calcula la inversa de la distribución para momento (anexo 30), obteniéndose así los valores siguientes:

Clase	Límite		Punto Medio	Frec	Frec Rel	Frec Acum	Frec Rel. Acum.	inv de probab Weibull
	Inferior	Superior						
	menor o igual	3.32		0	0	0	0	0
1	3.32	3.33667	3.32833	6	0.0632	6	0.0632	0.04
2	3.33667	3.35333	3.345	49	0.5158	55	0.5789	0.85
3	3.35333	3.37	3.36167	11	0.1158	66	0.6947	1.22
4	3.37	3.38667	3.37833	16	0.1684	82	0.8632	2.19
5	3.38667	3.40333	3.395	12	0.1263	94	0.9895	5.64
6	3.40333	3.42	3.41167	1	0.0105	95	1	5.71
	mayor de	3.42		0	0	95	1	0

Figura II.15 Tabla de clase y cálculo de la inversa de la distribución Weibull, para las solicitudes de momento. Fuentes: Elaboración propia (Software Statgraphic y Mathcad).

Una vez obtenidos los datos la inversa de la distribución, se grafican estos en función de los resultados de la división de los momentos que se obtienen como promedio de las clases y el vehículo MS-32 (para cargas puntuales y carga sustitutiva); en la tabla anterior se expresa el logaritmo base 10 de los momentos.

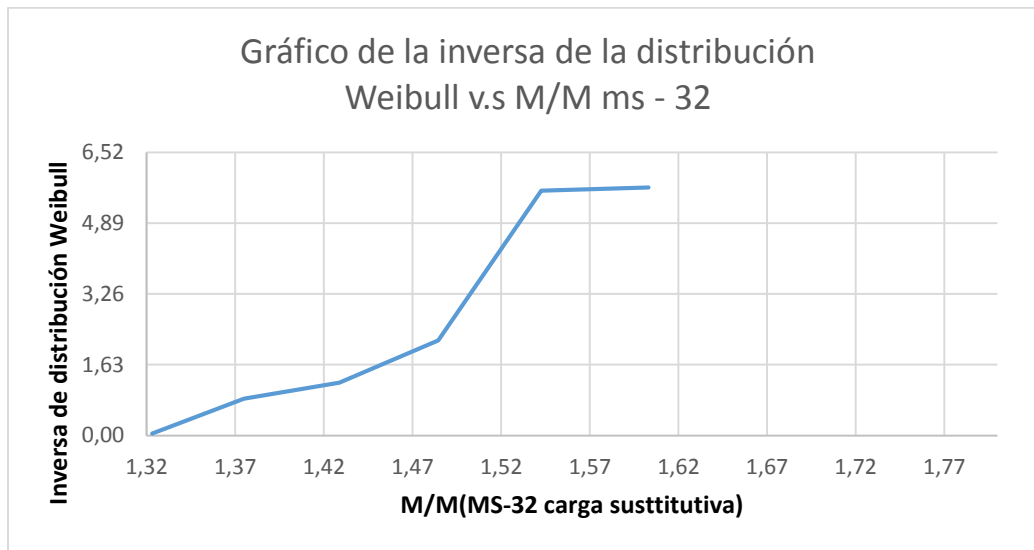


Figura II.16 Gráfico de la inversa de la distribución Weibull v.s M/M (MS – 32). Fuente: Elaboración propia (Software Microsoft Excel).

II.6.1 Extrapolación de los efectos.

Para la extrapolación es necesario conocer el número de vehículos que circulan diariamente por el tramo de vía analizado. Se tiene la muestra de dos años de mediciones pero con estos datos no se puede determinar el Promedio Anual de Intensidad Diaria del Tráfico debido a que no se tiene conocimiento de la cantidad de días en que se realizó, no obstante se realiza la extrapolación considerando el número de vehículos total de la muestra reducida, como la cantidad de vehículos que circulan en dos años, con lo que se están considerando conjuntamente los resultados de los aforos en Holguín – Moa, en la carretera central vía a Bayamo y en el anillo circunvalante.

Con los datos correspondientes a dos años, se calcula la cantidad de secuencias para 25, 50, 75 y 100 años respectivamente, luego se obtiene la probabilidad de que ocurran estos hechos por la ecuación $1-1/N$, siendo N la cantidad de vehículos obtenida la cantidad de años propuestos, para que se concluya con el cálculo de la inversa de la probabilidad y obtener los datos a extrapolar.

Es importante destacar que el último valor de la inversa de probabilidad de distribución de las solicitudes, en este caso 5.71 (Figura II.15) es igual a la extrapolación de 2 años de las solicitudes (Figura II.17); este tiempo es igual al

considerado para recolección de los datos, confirmándose así la veracidad de las consideraciones tomadas

Extrapolación				
Años	Secuencias	Frec. Acum	1-Frec.Acum	Inv. 1-Frec. Acum
2	100	0.01	0.99	5.71
10	1000	0.001	0.999	8.04
20	2000	0.0005	0.9995	9.07
25	2500	0.0004	0.9996	9.41
50	5000	0.0002	0.9998	10.46
75	7500	0.00013333	0.99986667	11.08
100	10000	0.0001	0.9999	11.52

Figura II.17 Extrapolación. Fuente: Elaboración propia (Software Mathcad y Microsoft Excel).

Se analizaron los dos casos de extrapolación, el primero con el cociente entre el momento de las secuencias y el modelo MS-32 para su versión de carga sustitutiva y el segundo con el resultado de dividir el momento de las secuencias y el modelo MS-32 para su versión en cargas puntuales (anexos 31). Los resultados fueron idénticos, por lo que solamente se ilustra el primer caso mencionado.

Teniendo en cuenta que la cola superior del gráfico representado en la Figura II.16 caracteriza a solo un evento de los 100 analizados Tabla representada en la Figura II.15 es obviada por no ser representativa de la población, la cola tomada es la anterior a la última como se muestra en la siguiente figura. La cola tomada es intersectada con las líneas de interpolación y al multiplicar la coordenada $x = (M/MMS-32 \text{ carga sustitutiva})$ de los puntos de unión de estas líneas y el momento producido por el vehículo normado MS-32 se obtienen las solicitudes extrapoladas para los diferentes periodos.

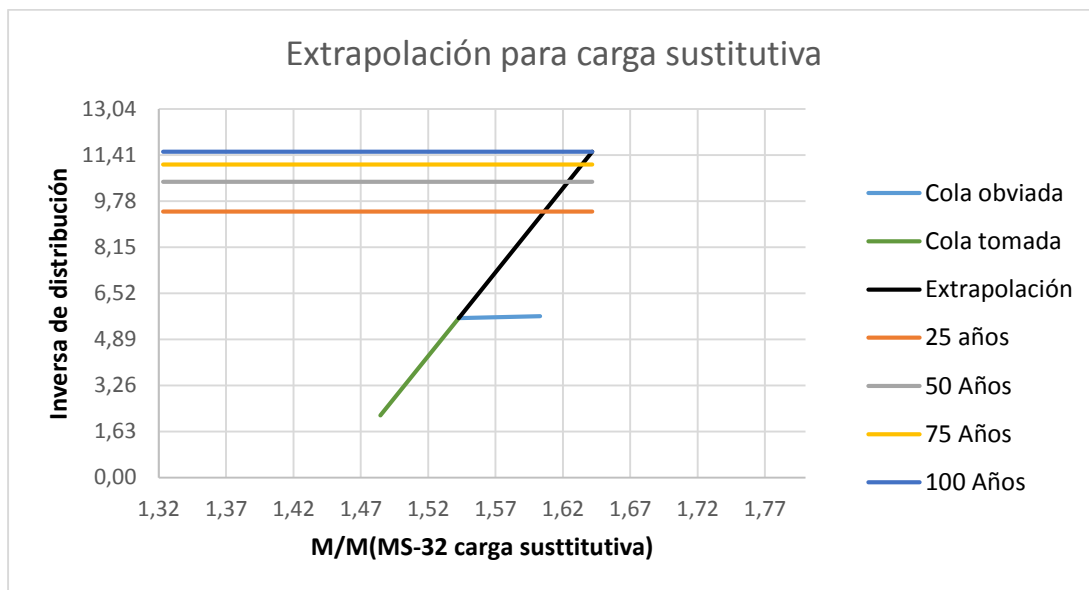


Figura II.18 Extrapolación de momentos. Fuente: Elaboración propia (Software Microsoft Excel)

Los valores de que arroja el gráfico anterior son:

Años	$x = M/M(\text{MS-32})$	Momento(MS-32)	Solic Extrapoladas
25	1.60608585	1609.5966	2585.15032
50	1.62376641		2613.6089
75	1.63420636		2630.41301
100	1.64166588		2642.41982

Figura II.19 Tabla de momentos extrapolados. Fuente: Elaboración propia (software Microsoft Excel).

II.7 Obtención del modelo.

Para obtener el modelo definitivo de la carga sustitutiva de diseño, se necesita calcular la carga distribuida, y las cargas concentradas que la forman, de tal manera que, al correr el nuevo modelo creado en el prototipo de puente seleccionado, se reporten solicitaciones equivalentes a las extrapoladas. El período de recurrencia escogido es de 50 años.

Luego de conocer las solicitaciones ocasionadas en el prototipo de puente para cargas unitarias, tanto distribuidas como concentradas, se procede a fijar un valor

de carga concentrada, luego por sumatoria de fuerzas se despeja la carga puntual como se muestra a continuación:

$$M_{\text{máx.}} = M_p + M_q.$$

Siendo $M_{\text{máx}}$ el momento extrapolado igual a 2613.6089 KNm. Luego si la carga unitaria distribuida tiene como solicitación máxima 106.9426 KNm y se escoge como valor para esta carga 15 entonces

$$M_q = 106.9426 \text{ KNm} \cdot 15 = 1604.139 \text{ KNm}$$

$$\text{Entonces: } M_p = M_{\text{máx.}} - M_q.$$

$$M_p = 2613.6089 \text{ KNm} - 1604.139 \text{ KNm}$$

$$M_p = 1009.4699 \text{ KNm}$$

Como se conoce el momento unitario de la fuerza concentrada 7.2403 KNm entonces:

$$P = M_p / M \text{ (unitario de la fuerza concentrada)}$$

$$P = 1009.4699 \text{ KNm} / 7.2403 \text{ KNm}$$

$$P = 139.423767 \approx 140$$

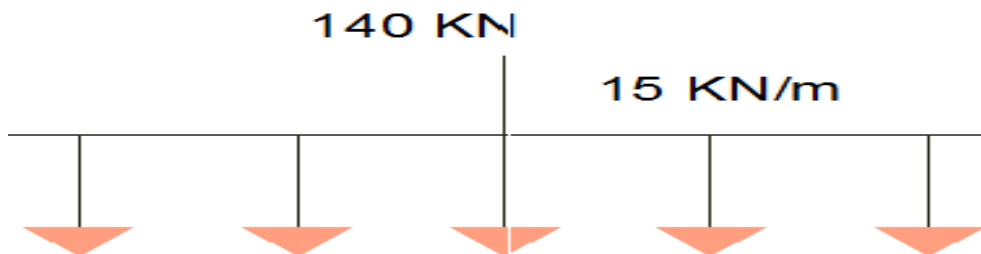


Figura II.20 Modelo de cargas obtenido. Fuente: Elaboración propia (Software AutoCad)

Luego de obtener el nuevo modelo de carga vertical este se debe correr sobre el prototipo de puente (anexo 31). Los esfuerzos máximos obtenidos son: momento 2617.753 KN*m, cortante 354.396 KN y torsión 778.297 KN*m. Al comparar el momento obtenido con la extrapolación para 50 años (2613.60 KN*m) resulta una diferencia de 4.153 Kn*m, esta discrepancia se debe al redondeo. Entonces se puede concluir que las solicitaciones extrapoladas están en correspondencia con

las solicitaciones originadas por el modelo generando, representando este las solicitaciones generadas por el tráfico cubano.

II.8 Comparación entre el nuevo modelo obtenido y el vehículo normado MS – 32.

La carga concentrada para el modelo obtenido es 58.3 KN mayor la representada en la modelo MS-32 de carga distribuida, este incremento representa un 71.5%. La carga distribuida del modelo que se propone es mayor en 5.48 KN/m que la del modelo normado, representando un incremento de 57.56%.

II.9 Consideraciones para el uso del nuevo modelo de cargas verticales móviles para el diseño de puentes de carretera obtenido.

Para la elaboración del presente modelo se tuvieron en consideración los criterios establecidos en la norma NC 733: 2009, por lo tanto la aplicación de este considera principios de la normativa cubana.

El modelo es propio de una carga de carril o línea de diseño; como se conoce internacionalmente. Incluye una carga puntual para el cálculo de momento y una para el cálculo del cortante. La carga distribuida es común para ambas situaciones de cálculo.

- Colocación transversal del modelo.
 - La carga de carril se coloca en todo el ancho útil de la calzada, paralelo al eje del puente y en el mismo sentido de circulación.
- Colocación longitudinal del modelo.
 - Se debe colocar con los valores de carga de momento y cortante, según la solicitud que se desea determinar.
 - No se puede aplicar más de una carga concentrada de momento. Esta carga se permite no aplicarla de forma continua, cargando así solo los tramos de igual signo en las líneas de influencia
 - Ahora, si se permite aplicar más de una carga concentrada de cortante, con el objetivo de obtener la solicitud más desfavorable. Esta se aplica en los tramos de igual signo en las líneas de influencia.

Conclusiones del capítulo

Se planteó y aplicó el procedimiento para obtener un modelo de carga vertical móvil. Se obtuvieron las solicitaciones de momento, cortante y torsión generadas por las secuencias de vehículos que representan el tráfico real que circula por nuestras vías. Fueron comparados los resultados obtenidos con los arrojados por el vehículo de diseño MS-32: siendo estos superiores en todos los aspectos. Se procesaron estadísticamente los momentos obtenidos y fueron extrapolados para 25, 50,75 y 100 años. Se obtuvo un modelo de carga que reproduce los efectos del tráfico real en el prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, que representa una carga sustitutiva de carril, siendo este superior al modelo normado en 71.5% para la carga concentrada y 57.56% para la carga distribuida.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se realizó un análisis histórico referente a los modelos de cargas verticales móviles en diferentes normativas y la evolución en la norma cubana para puentes de carreteras.
- Se caracterizaron las variables que inciden y los métodos de obtención de los modelos de carga verticales móviles.
- Se describe el tráfico actual y las características del parque vehicular cubano para su posterior representación en el modelo de cargas verticales móviles en el prototipo de puente seleccionado.
- Se ilustró el procedimiento para la obtención de modelos de cargas verticales móviles.
- Se obtuvieron las solicitaciones generadas por el tráfico real cubano y las producidas por el modelo de carga vertical móvil MS-32 (para carga sustitutiva y cargas puntuales), resultando las primeras mayores en un 42.35% y en 15.96% para momento, 60.9% y 24.42% para cortante y un 21.3% y 11.2% para torsión.
- Se obtuvo un modelo de carga vertical móvil para el diseño de puentes de tipología cubana a partir del análisis de secuencias vehiculares del tráfico actual, que supera en 71.5% para la carga concentrada y 57.56% para la carga distribuida al modelo normado MS-32.
- El modelo es aplicable para puentes de tipología cubana con luces menores o iguales a 30 metros.

RECOMENDACIONES

- Evaluar este modelo en otros puentes de diferente tipología constructiva de la red vial cubana y comparar sus efectos con respecto al vehículo normado.
- Aplicar este procedimiento de secuencias vehiculares partiendo de una muestra más amplia de efectos obtenidos para el análisis estadístico y el ajuste a la distribución probabilístico para hacer más exacta la investigación.
- Continuar este trabajo con secuencias vehiculares, pero cargando los 2 carriles.
- A partir de los resultados obtenidos comprobar el diseño del puente sobre el río Mayarí, para asegurar su resistencia.
- Realizar un estudio para establecer señalizaciones en las cercanías del puente con respecto al límite de peso y de velocidad de los vehículos que circulen sobre este.

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO (LFRD) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), United States, (2004), LFRD Bridge Design Specifications, Sección 3 p.3-27.
2. AASTHO, Standart Specificationshor higway Bridges, 17 th Edition. (2005)
3. Al., 2006, www.itl.nist.gov/div898/handbook.
4. ALMAGUER GONZÁLEZ, J; (2011): "Contribuciones a la caracterización geométrica y estimación simplificada del estado de carga por siluetas del parque vehicular existente en Holguín". Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba.
5. ANG et Al., 1975, www.itl.nist.gov/div898/handbook.
6. BENITEZ. R y MEDINA. A (2001): Manual de Diseño geométrico de Carreteras, 2001. Cap.1, p.1-65.
7. COLECTIVO DE AUTORES; (1986) Ficha técnica del Puente sobre el Río Mayarí. Inventario Nacional de puentes: Informe de inspección, Vialidad, Cuba.
8. COLECTIVO DE AUTORES; (2015) Ficha técnica del Puente sobre el Río Mayarí. Inventario Nacional de puentes: Informe de inspección, Vialidad, Cuba.

9. Díaz, A; (2010): "Estudio tipológico de los puentes de la carretera Holguín – Moa y modelación estructural para el análisis de la influencia de la fuerza de frenado". Trabajo de Diploma en opción el título de ingeniero civil. UHo, Cuba.
10. EUROCÓDIGO 1 - Base de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3. Acciones de tráfico en puentes. 2012. (Pg. 22-24).
11. GHOSN, M.; MOSES, F. (1986). Reliability calibration of bridge design code. Journal of Structural Engineering, v.112, n.4, p.745-763, apr.
12. INFANTE SUÁREZ, D; (2013): "Obtención de un modelo de carga vertical móvil en un prototipo del Puente sobre el Río Mayarí, utilizando resultados de aforos manuales". Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba. (Pg. 18).
13. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE –SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES: Modelo de cargas vivas 66.5
14. Introducción a la ingeniería del tránsito. 2003 Instituto de ingeniería de transportes (1099 14th street, NW, suite 300 west Washington, DC 20005-3438 USA, www.ite.org.
15. MALDONADO FERREIRA, L. (2006): "Aplicação da teoria da confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto" ,Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Estruturas, Brasil.
16. Manual de estudios de ingeniería del tránsito. Tomo XII programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas
17. MOSES, F. (1999): Bridge reliability concepts and methods. In: FRANGOPOL, D.M.(Ed). Bridge safety and reliability. Reston: ASCE. Cap.1, p.1-22.
18. Norma Cubana de requisitos de diseño y métodos de cálculo "Carreteras—pavimentos flexibles—". NC-334:2004 Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana. Edición Marzo 2004

19. Norma Cubana de requisitos de diseño y métodos de cálculo de carreteras, puentes y alcantarillas - NC 733:2009, 2009. Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana. Cap.7, p.25-38.
20. Norma Cubana NC 53:125 "Puentes y Alcantarillas". Especificaciones de proyecto y Métodos de cálculo, 1984. NC 53:125
21. Norma Mexicana SCT de Cargas Vivas 2004.
22. NOWAK, A. (1993): Structural Safety. Editorial EEUU, 1993. Cap.13, p.53-66.
23. OCHOA, C; (2008) "Diseño de superestructuras de puentes de hormigón armado. Comparación entre diseño según Norma ASSHTO Standart (Método ASD) y Norma ASSHTO LRFD", Tesis en opción AL título de Ingeniero Civil en Obras Civiles Universidad Austral de Chile, Chile 2008, p 45
24. RAMÍREZ RODRÍGUEZ, R; (2015): "Obtención de un modelo de carga vertical móvil para puentes de tipología cubana, en la Carretera Holguín-Moa". Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba. (Pg. 18).
25. RAMOS CRUZ, M; (2012): "Monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en la carretera Holguín - Moa orientado hacia el estudio de la fuerza de frenado." Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba.
26. ROSSIGALI, C; (2006): "Estudos probabilísticos para modelos de cargas móveis em pontes rodoviárias no Brasil".
27. SAGRILO et Al., 2004, EHLERS www.itl.nist.gov/div898/handbook.
28. SARDIÑAS, A; (2009) "Método para el cálculo de pavimento rígido". Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil. CUJAE, Habana, Cuba.
29. TAYLOR HERNÁNDEZ, G; "Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de hormigón"

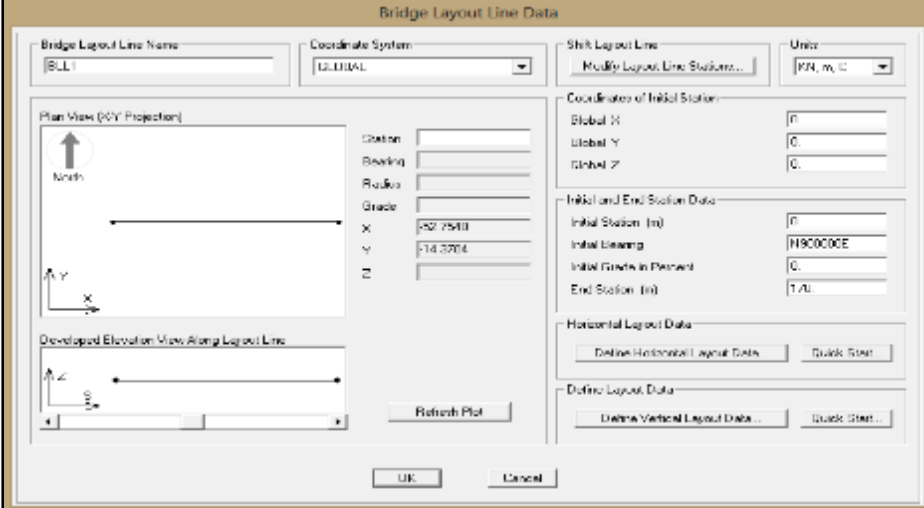
30. TAYLOR, G; LAZO, L y RODRÍGUEZ, (2006): Manual para la Inspección y Conservación de Puentes de Hormigón Estructural. Editorial Félix Varela.
31. VILLALÓN CABALLERO, L; (2011): "Estudio tipológico del parque vehicular existente en Holguín, monitoreo y análisis del comportamiento del tráfico en la carretera Holguín-Moa." Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Civil. UHo, Cuba.
32. WALCK, 2001, www.itl.nist.gov/div898/handbook.

ANEXOS

Anexo – 1.

Ver carpeta: Anexos – Documento Excel: Características del parque vehicular cubano.

Anexo – 2.

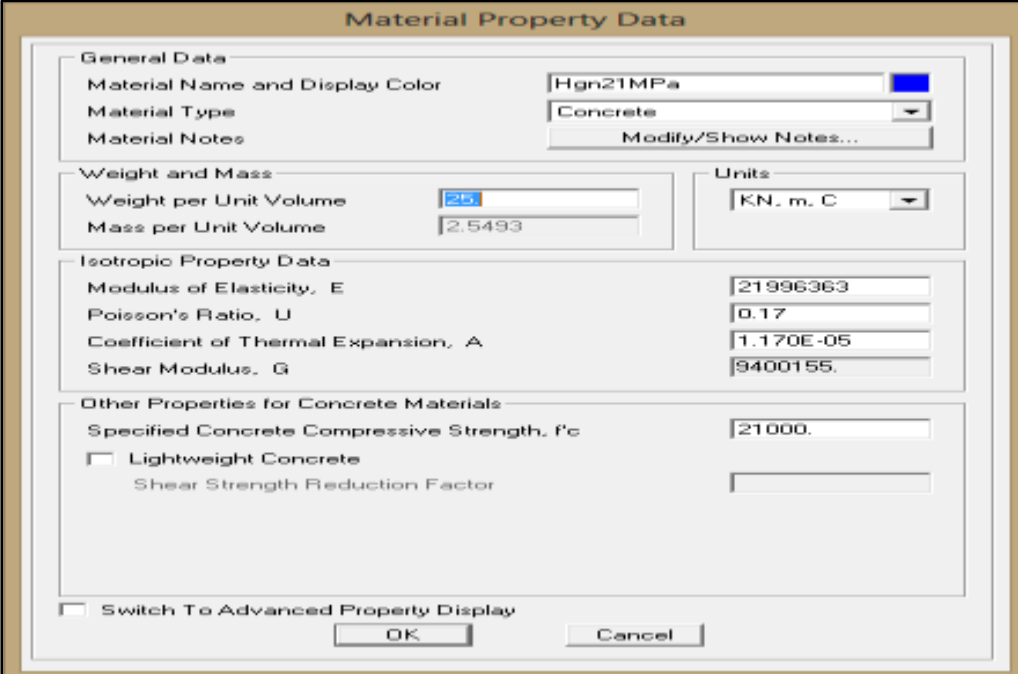


The "Bridge Layout Line Data" dialog box is used for defining the geometry and data for a bridge layout line. It includes fields for the line name, coordinate system, and unit. It also features two plots: a Plan View (2D Projection) and a Developed Elevation View Along Layout Line. The Plan View shows a line segment with a north arrow and a coordinate system. The Developed Elevation View shows a line segment with a vertical axis and a horizontal axis. The dialog box includes buttons for "OK", "Cancel", "Refresh Plot", "Define Horizontal Layout Data...", "Quick Start...", "Define Vertical Layout Data...", and "Quick Start...".

Field	Value
Bridge Layout Line Name	SLL1
Coordinate System	GLOBAL
Unit	KN, m, C
Global X	0
Global Y	0
Global Z	0
Initial Station (m)	0
Initial Bearing	1900000
Initial Grade in Percent	0
End Station (m)	1.0
Horizontal Layout Data	Define Horizontal Layout Data... Quick Start...
Vertical Layout Data	Define Vertical Layout Data... Quick Start...

Ventana Bridge Layout Line Data. (Software CSiBridge).

Anexo – 3.

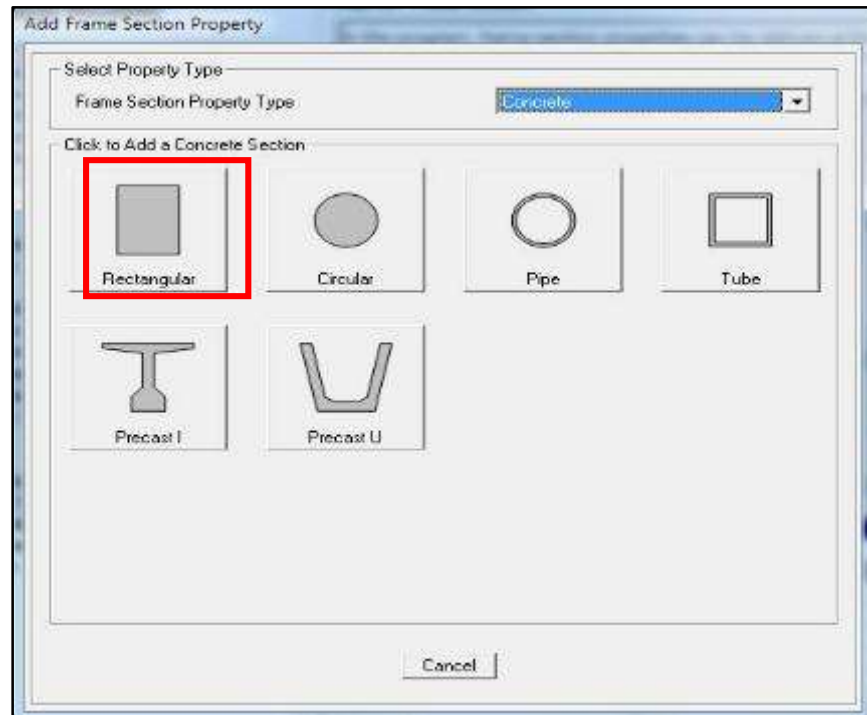


The "Material Property Data" dialog box is used for defining the material properties for a bridge. It includes fields for the material name, type, and notes. It also features sections for Weight and Mass, Isotropic Property Data, and Other Properties for Concrete Materials. The dialog box includes buttons for "OK", "Cancel", "Modify/Show Notes...", and "Switch To Advanced Property Display".

Field	Value
Material Name and Display Color	Hgn21MPa
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight per Unit Volume	25
Mass per Unit Volume	2,5493
Units	KN, m, C
Modulus of Elasticity, E	21996363
Poisson's Ratio, U	0.17
Coefficient of Thermal Expansion, A	1.170E-05
Shear Modulus, G	9400155
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	21000
Lightweight Concrete	<input type="checkbox"/>
Shear Strength Reduction Factor	
Switch To Advanced Property Display	<input type="checkbox"/>

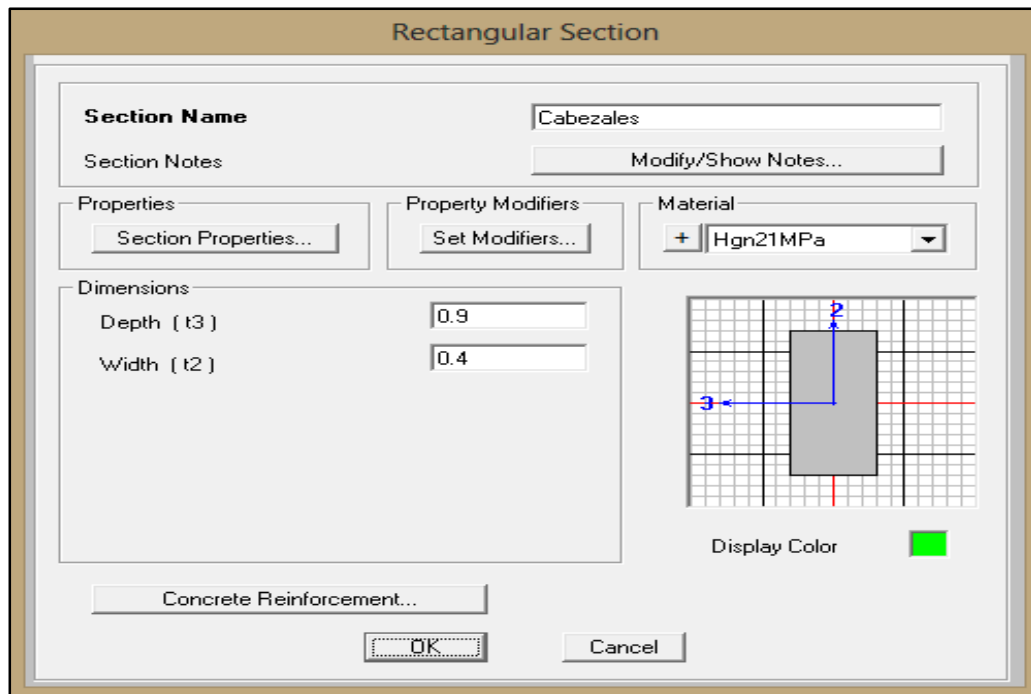
Ventana Material Properties Data.

Anexo – 4.



Ventana Add Frame Section Property.

Anexo – 5.



Sección transversal de los cabezales.

Anexo – 6.

Rectangular Section

Section Name

Section Notes

Properties

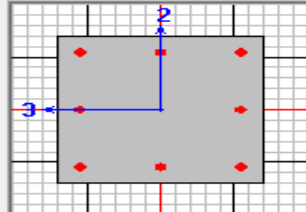
Property Modifiers

Material

Dimensions

Depth (t3)

Width (t2)



Display Color

Sección transversal de las columnas.

Anexo – 7.

Link/Support Property Data

Link/Support Type

Property Name

Property Notes

Total Mass and Weight

Mass Rotational Inertia 1

Weight Rotational Inertia 2

Rotational Inertia 3

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs

Directional Properties

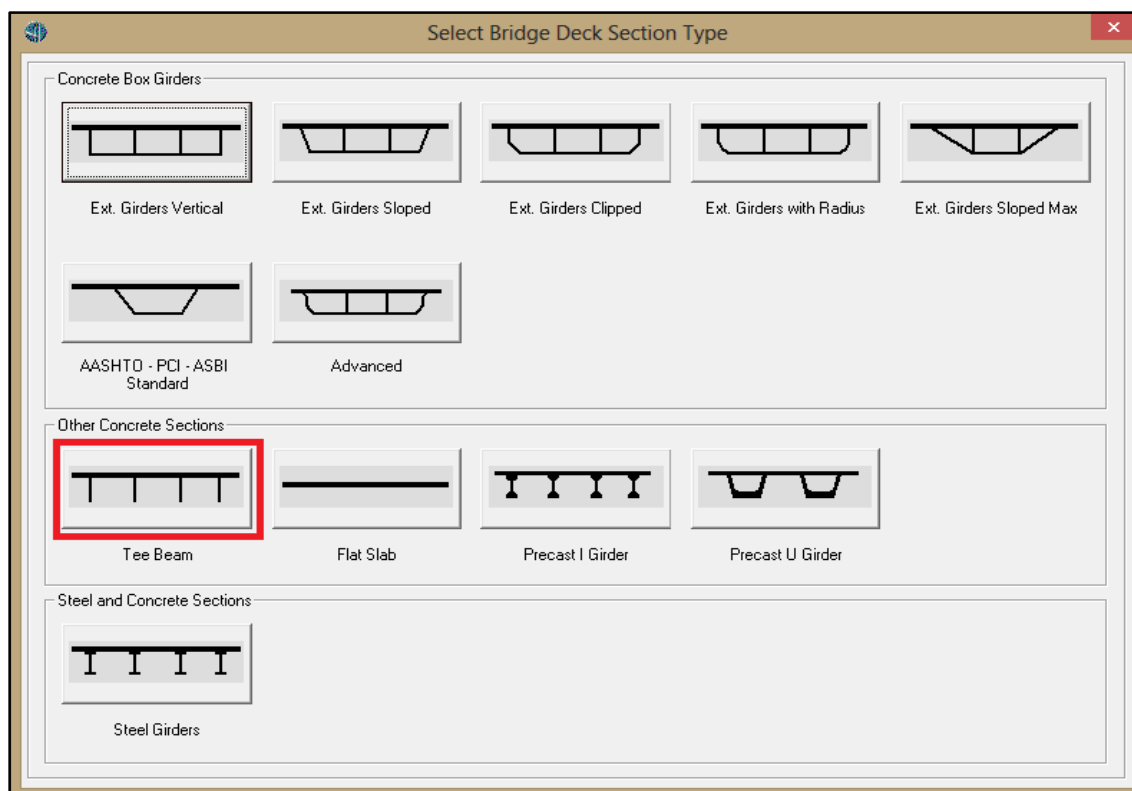
Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>

Properties

P-Delta Parameters

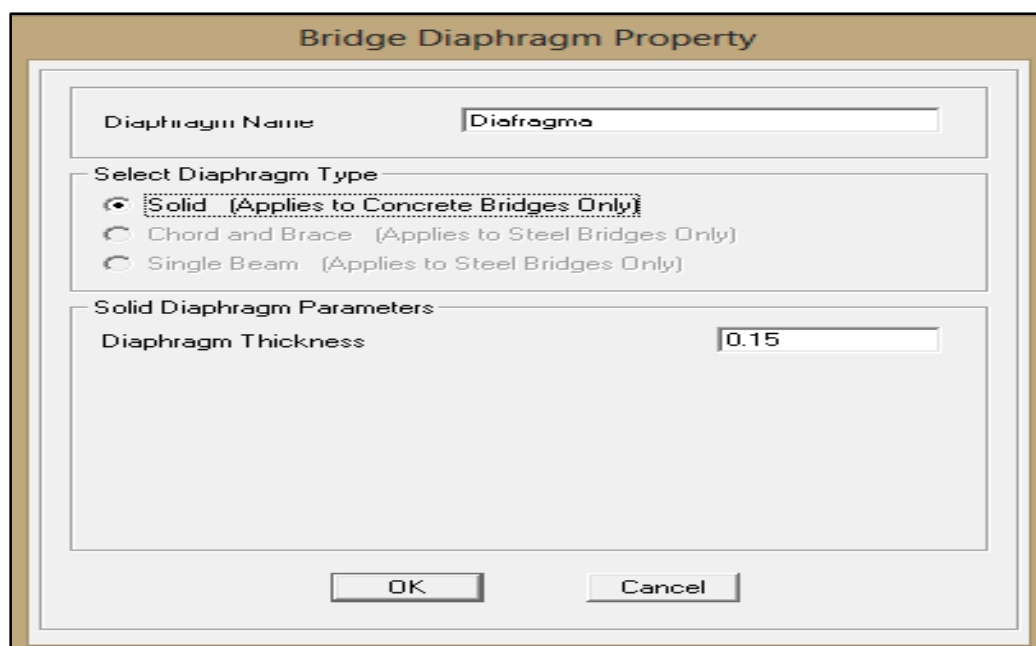
Ventana Link / Support Property Data.

Anexo – 8.



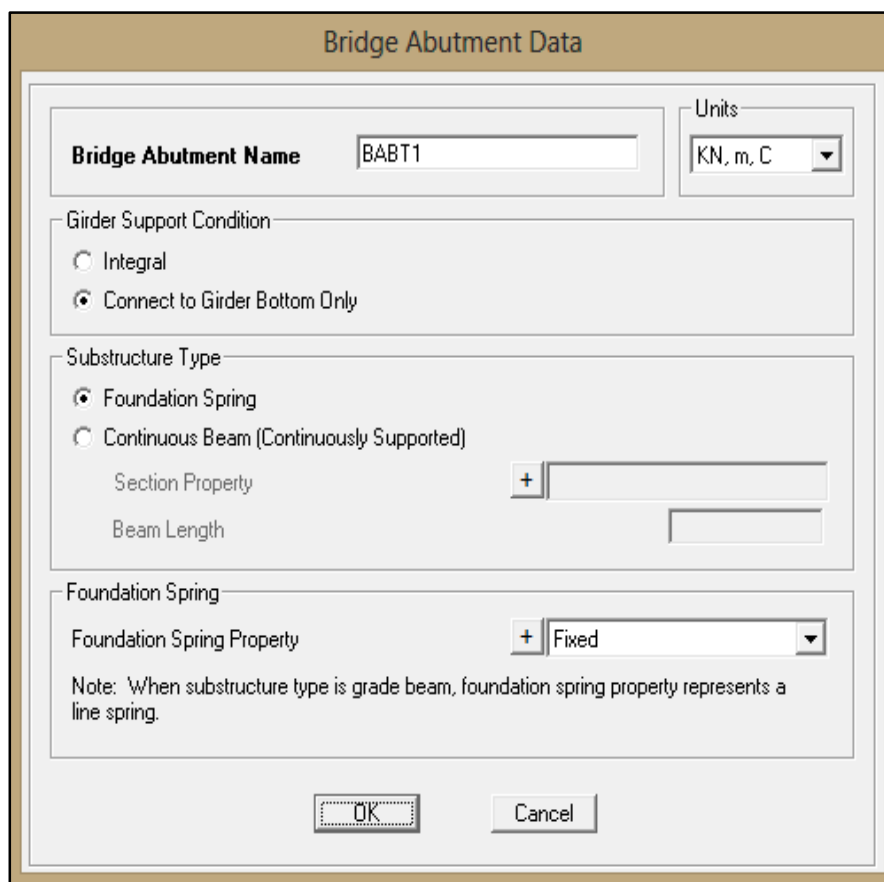
Ventana Select Bridge Deck Section Type.

Anexo – 9.



Ventana Bridge Diaphragm Property.

Anexo – 10.



The image shows a software dialog box titled "Bridge Abutment Data". It contains several input fields and radio button options. At the top right, there is a "Units" dropdown menu set to "KN, m, C". Below this, the "Bridge Abutment Name" is set to "BABT1". The "Girder Support Condition" section has two radio buttons: "Integral" and "Connect to Girder Bottom Only", with the latter being selected. The "Substructure Type" section has two radio buttons: "Foundation Spring" (selected) and "Continuous Beam (Continuously Supported)". Below the "Continuous Beam" option are input fields for "Section Property" (with a "+" button) and "Beam Length". The "Foundation Spring" section has a "Foundation Spring Property" dropdown menu set to "Fixed" (with a "+" button). A note at the bottom of this section states: "Note: When substructure type is grade beam, foundation spring property represents a line spring." At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancel" buttons.

Bridge Abutment Data	
Bridge Abutment Name	BABT1
Units	KN, m, C
Girder Support Condition	
<input type="radio"/> Integral	
<input checked="" type="radio"/> Connect to Girder Bottom Only	
Substructure Type	
<input checked="" type="radio"/> Foundation Spring	
<input type="radio"/> Continuous Beam (Continuously Supported)	
Section Property	+
Beam Length	
Foundation Spring	
Foundation Spring Property	+
Fixed	
Note: When substructure type is grade beam, foundation spring property represents a line spring.	
OK	Cancel

Ventana Bridge Abutment Data.

Anexo – 11.

Bridge Bent Data

Bridge Bent Name <input type="text" value="Pilas"/>		Units <input type="text" value="KN, m, C"/>	Girder Support Condition Before Bent <input type="radio"/> Integral <input checked="" type="radio"/> Connect to Girder Bottom Only
Bent Data Cap Beam Length <input type="text" value="11.8"/> Number of Columns <input type="text" value="2"/> Cap Beam Section <input type="text" value="+ Cabezales"/>		Location of Bearing Line Before Bent Distance from Bent to Bearing Line <input type="text" value="0.22"/>	
Modify/Show Column Data...		Girder Support Condition After Bent <input type="radio"/> Integral <input checked="" type="radio"/> Connect to Girder Bottom Only	
Bent Type <input type="radio"/> Single Bearing Line (Continuous Superstructure) <input checked="" type="radio"/> Double Bearing Line (Discontinuous Superstructure)		Location of Bearing Line After Bent Distance from Bent to Bearing Line <input type="text" value="0.22"/>	
<input type="button" value="OK"/>		<input type="button" value="Cancel"/>	

Ventana Bent Data.

Anexo – 12.

Bridge Object Data

Bridge Object Name <input type="text" value="B0BJ1"/>		Layout Line Name <input type="text" value="BLL1"/>	Coordinate System <input type="text" value="GLOBAL"/>	Units <input type="text" value="KN, m, C"/>
Define Bridge Object Reference Line				
Span Label	Station m	Span Type		
Start Abutment	0.	Start Abutment		
Start Abutment	0.	Start Abutment		
Span1	25.	Full Span to End Bent		
Span2	55.	Full Span to End Bent		
Span3	85.	Full Span to End Bent		
Span4	115.	Full Span to End Bent		
Span5	145.	Full Span to End Bent		
Span To End Abutment	170.	Full Span to End Abutment		
Note: 1. Bridge object location is based on bridge section insertion point following specified layout line.			<input type="button" value="Add"/> <input type="button" value="Modify"/> <input type="button" value="Delete"/> <input type="button" value="Delete All"/>	
			Modify/Show Assignments <input type="text" value="Spans"/> <input type="text" value="User Discretization Points"/> <input type="text" value="Abutments"/> <input type="text" value="Bents"/> <input type="text" value="In-Span Hinges (Expansion Jt)"/> <input type="text" value="In-Span Cross Diaphragms"/> <input type="text" value="Superelevation"/> <input type="text" value="Prestress Tendons"/> <input type="text" value="Girder Rebar"/> <input type="text" value="Staged Construction Groups"/> <input type="text" value="Point Load Assigns"/> <input type="text" value="Line Load Assigns"/>	
Bridge Object Plan View (X-Y Projection)			<input type="button" value="Modify/Show..."/>	
			<input type="button" value="Show Enlarged Sketch..."/>	
<input type="button" value="OK"/>			<input type="button" value="Cancel"/>	

Ventana Bridge Object Data.

Anexo – 13.

Bridge Object In-Span Cross-Diaphragm Assignments

Bridge Object Name: Units:

In-Span Cross-Diaphragm Definition:

Span	Diaphragm Property	Distance	Boating	Location
Span1	Diaphragm	0.5	Default	All Spaces
Span1	Diaphragm	6.5	Default	All Spaces
Span1	Diaphragm	12.5	Default	All Spaces
Span1	Diaphragm	18.5	Default	All Spaces
Span1	Diaphragm	24.5	Default	All Spaces
Span2	Diaphragm	1.	Default	All Spaces
Span2	Diaphragm	8.	Default	All Spaces
Span2	Diaphragm	15.	Default	All Spaces
Span2	Diaphragm	22.	Default	All Spaces
Span2	Diaphragm	29.	Default	All Spaces
Span3	Diaphragm	1.	Default	All Spaces
Span3	Diaphragm	8.	Default	All Spaces
Span3	Diaphragm	15.	Default	All Spaces
Span3	Diaphragm	22.	Default	All Spaces
Span3	Diaphragm	29.	Default	All Spaces
Span4	Diaphragm	1.	Default	All Spaces
Span4	Diaphragm	8.	Default	All Spaces
Span4	Diaphragm	15.	Default	All Spaces
Span4	Diaphragm	22.	Default	All Spaces

Buttons: Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Ventana Diaphragms Assignments.

Anexo – 14.

Bridge Lane Data

Lane Name

Coordinate System

Units

Maximum Lane Load Discretization Lengths

Along Lane

Across Lane

Additional Lane Load Discretization Parameters Along Lane

☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ of Span Length

☒ Discretization Length Not Greater Than 1/ of Lane Length

Lane Data

Bridge Layout Line	Station m	Centerline Offset m	Lane Width m
BLL1	0.	1.6	3.4
BLL1	0.	1.6	3.4
BLL1	170.	1.6	3.4

Move Lane...

Add

Insert

Modify

Delete

Plan View (X-Y Projection)

Layout Line

Station

Bearing

Radius

Grade

X

Y

Z

☒ Snap To Layout Line

☐ Snap To Lane

Objects Loaded By Lane

☒ Program Determined

☐ Group

Lane Edge Type

Left Edge

Right Edge

Display Color ☒

OK

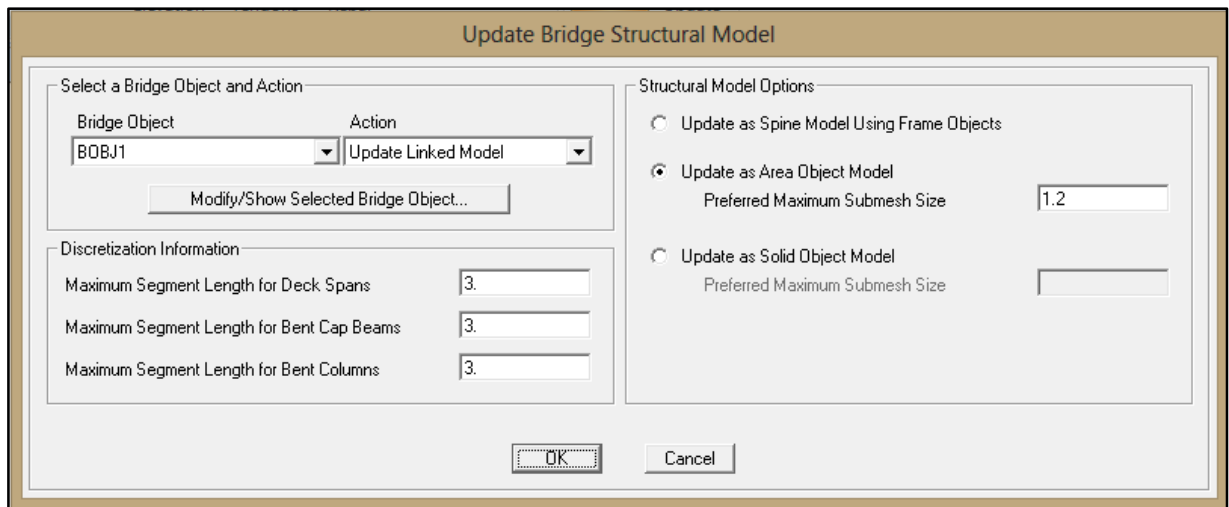
Cancel

Ventana Bridge Lane Data.

Anexo – 15.

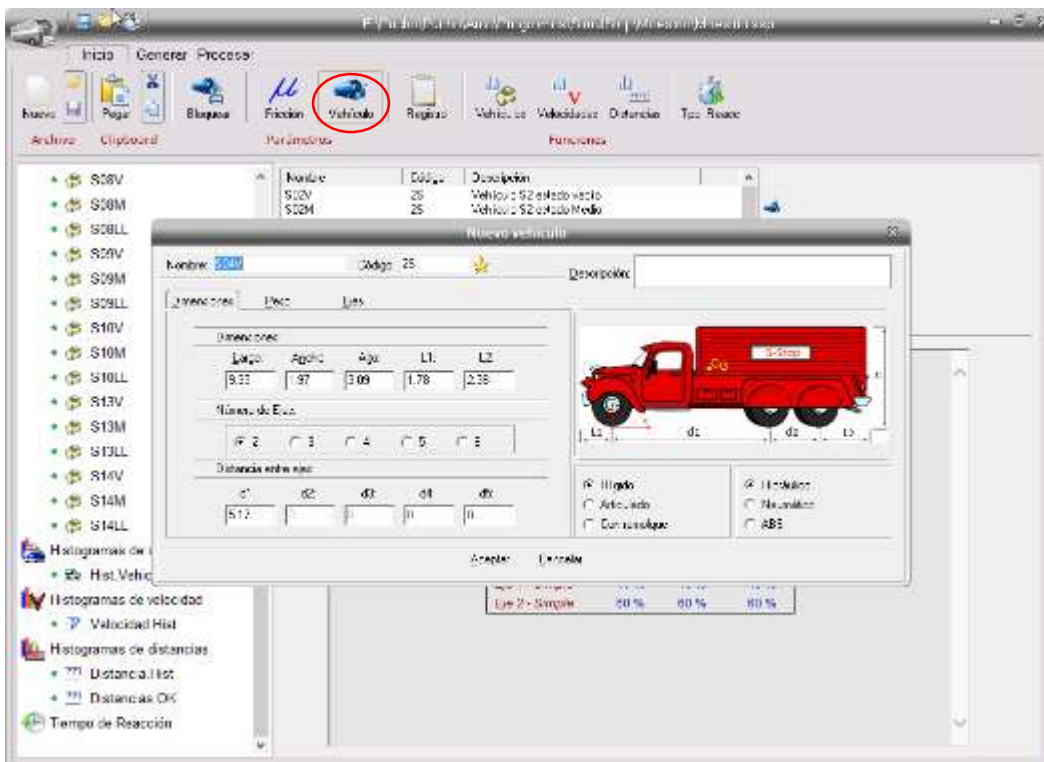


Botón Update.



Ventana Update Bridge Structural Model.

Anexo – 16



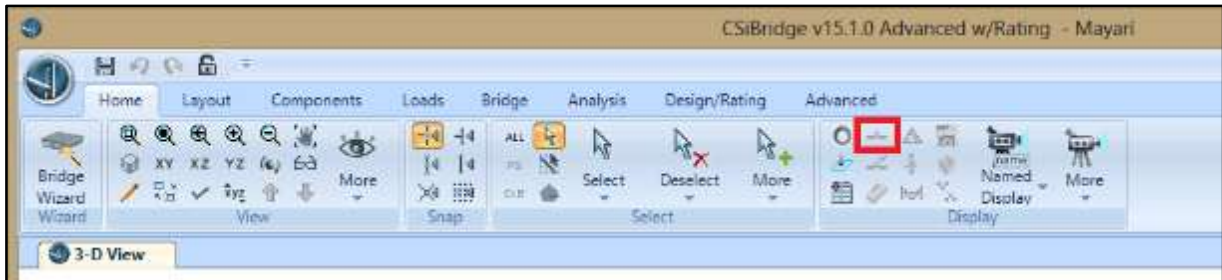
Características de los vehículos o siluetas. Software SimulStop

Anexo – 17



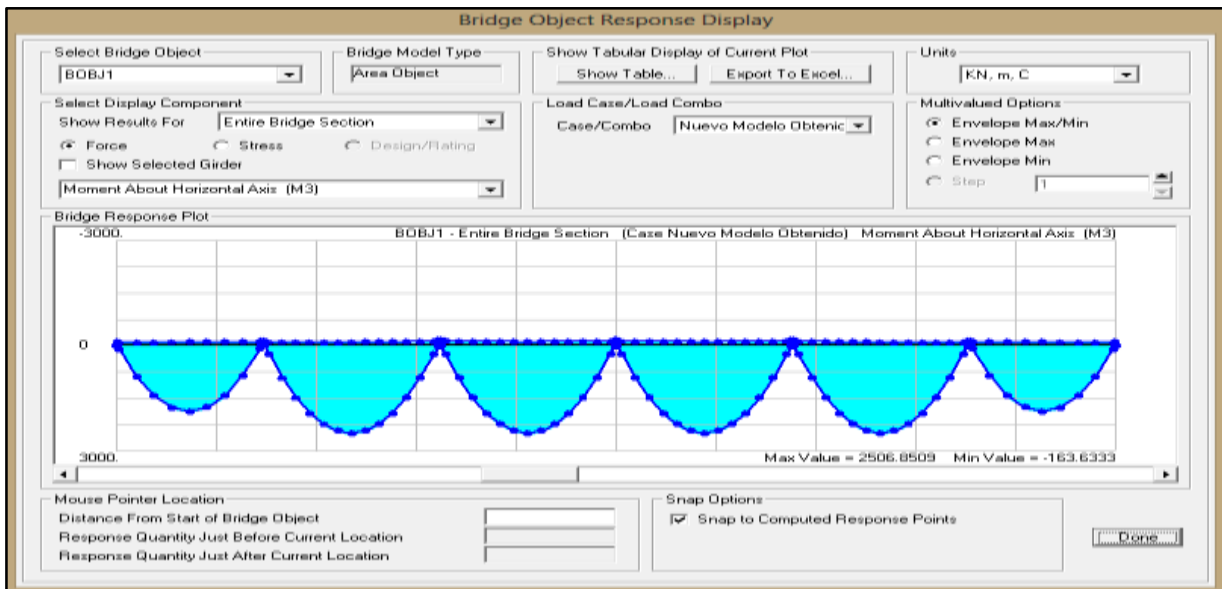
Menú: Analysis / botón: Run Analysis.

Anexo – 22



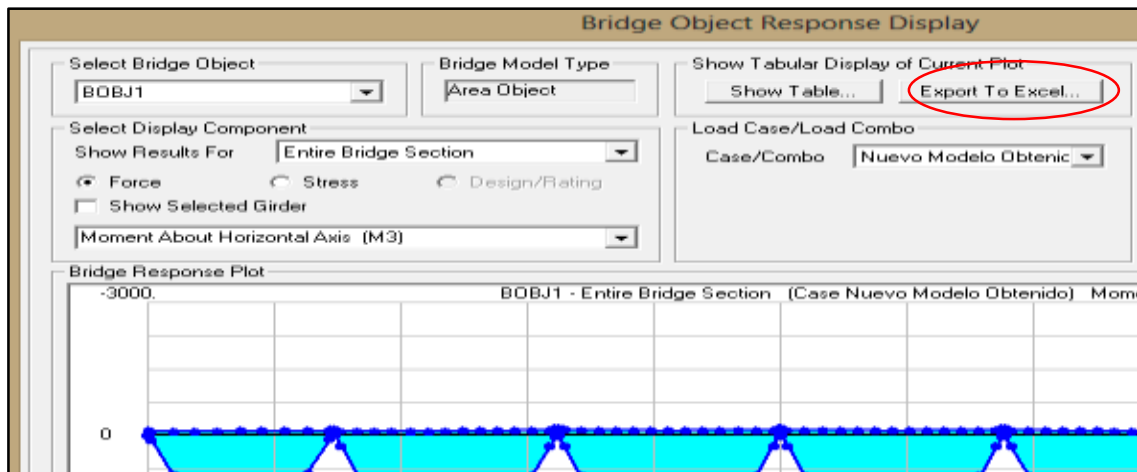
Menú: Home / botón: Show Bridge Superstructure Forces – Stresses.

Anexo – 23



Ventana Bridge Object Response Display.

Anexo – 24



Ventana Bridge Object Response Display.

Anexo – 25

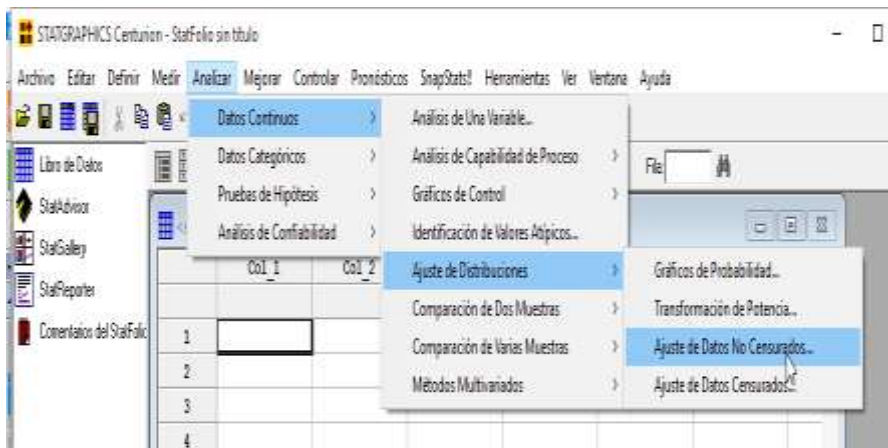
Ver carpeta: Anexos – carpeta: Excel. Aquí se encuentran los reportes de las 100 secuencias, los modelos MS-32 en sus 2 versiones, cada silueta del parque vehicular cubano por separado y las cargas unitarias puntual y distribuida.

Anexo – 26.

Vistas de Datos			Mostrar			Zoom		
C356			=MAX(C3:C354)					
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Distanc	ItemTy	P	V2	V3	T	M2	M3
2	m		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
3	0 Max		0.777	101.448	0.594	15.9772	-0.3376	0.0464
4	0 Min		-0.148	-0.524	-4.689	-2.4256	0.0798	-0.2319
5	0.22 Max		0.777	101.448	0.594	15.9772	-0.0565	0.1554
6	0.22 Min		-0.148	-0.524	-4.689	-2.4256	0.8761	-22.5093
7	0.22 Max		0.942	4.986	20.559	31.583	-10.3437	6.1502
8	0.22 Min		-7.949	-52.301	-0.251	-38.1292	14.4397	-28.7195
9	0.5 Max		0.942	4.986	20.559	31.583	-13.0267	10.3012
10	0.5 Min		-7.949	-52.301	-0.251	-38.1292	12.0634	-27.2701
11	0.5 Max		5.881	1.15	10.811	14.5165	-3.9915	12.9521
12	0.5 Min		-15.199	-90.727	-2.551	-13.5321	7.3676	-24.0701
354	170 Min		-0.148	-99.352	-0.59	-15.6644	0.0791	-0.2303
355								
356	Máximo		33.806	101.448	22.888	38.1506	14.4397	281.4406
357	Mínimo		-48.243	-99.352	-23.947	-38.1292	-13.0643	-41.7508
358								

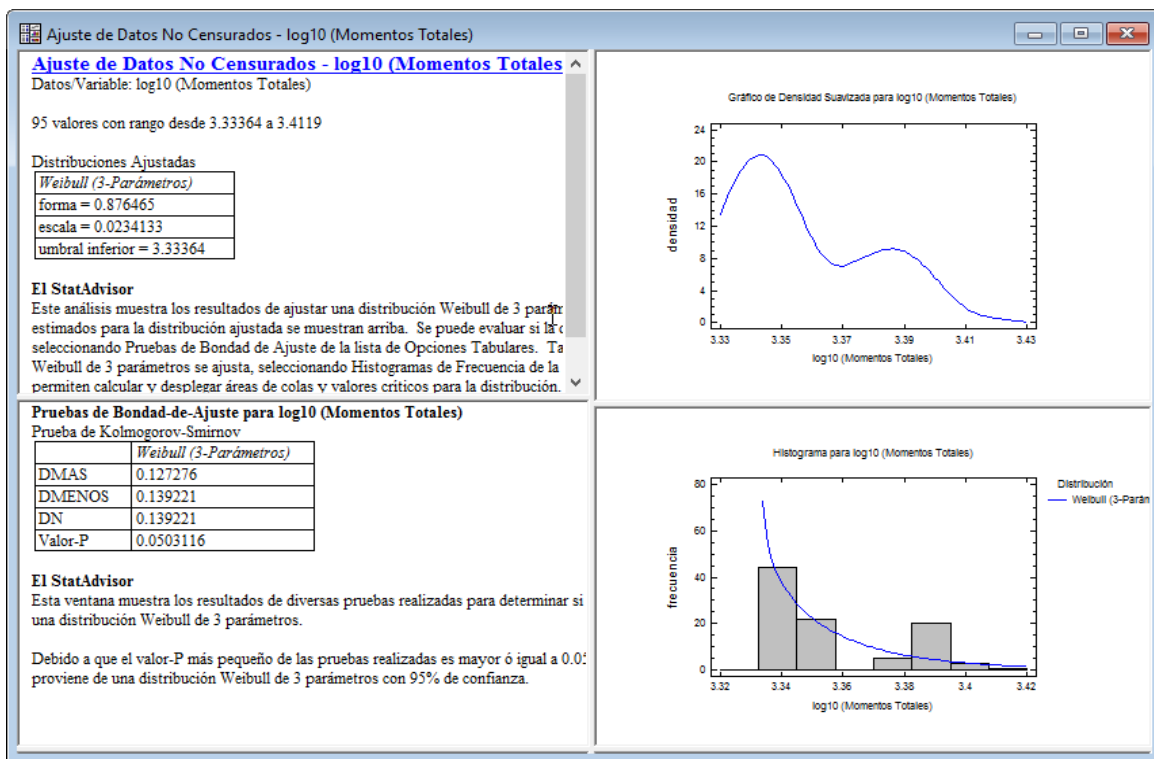
Función Máximos y Mínimos. Software Microsoft Excel.

Anexo – 27



Ajuste de datos no censurados. Software Statgraphics.

Anexo – 28.



Ajuste de distribución y pruebas correspondientes. Software Statgraphics.

Anexo – 29.

Ver carpeta: Anexos – carpeta: Statgraphics. –Documento: Momentos Totales

Anexo – 30.

Ver carpeta: Anexos – carpeta: Mathcad–Documento: Modelo logarítmico inversa.

Anexo – 31.

Ver carpeta: Anexos – carpeta: Extrapolación–Documento: Extrapolación (Microsoft Excel).

Anexo – 32.

Ver carpeta: Anexos – carpeta: Comprobación–Documento: Comprobación del modelo obtenido (Microsoft Excel).